بول نيرس

PAUL NURSE

الحائز على جائزة نوبل



ما هي الحياة؟

فَهمُ عِلمِ الأحياء في خَمسِ خطوات



تحرير: بن مارتينوغا

BEN MARTYNOGA

مكتبة
الحبر الإلكتروني
@bookkn
d110d

ترجمة:

د. عامر شيخوني

تُرجم إلى 22 لغة عالمية



الدار العربية للعلوم ناشرون

Arab Scientific Publishers, Inc.

بول نيرس
PAUL NURSE
الحائز على جائزة نوبل

ما هي الحياة؟

فهم علم الأحياء في خمس خطوات

WHAT IS LIFE?

مكتبة الحبر الإلكتروني
مكتبة العرب الحصرية

إن جميع الصور والأشكال التوضيحية الواردة في الكتاب،
تم الاستعانة بها من كتاب:
"قصة الوراثة: كيف كشفها رجالها" للدكتور عامر شيخوني.

بول نيرس
PAUL NURSE
الحائز على جائزة نوبل

ما هي الحياة؟

فهم علم الأحياء في خمس خطوات

WHAT IS LIFE?

تحرير: بن مارتينوغا
BEN MARTYNOGA

ترجمة:
د. عامر شيخوني

مراجعة: د. عماد يحيى الفرجي



الدار العربية للعلوم ناشرون ش.م.ل
Arab Scientific Publishers, Inc. SAL

يتضمن هذا الكتاب ترجمة الأصل الإنكليزي

WHAT IS LIFE?

Understand Biology in Five Steps

حقوق الترجمة العربية مرخّص بها قانونياً من الناشر

David Fickling Books

بمقتضى الاتفاق الخطي الموقّع بينه وبين الدار العربية للعلوم ناشرون، ش.م.ل.

Text Copyright © Paul Nurse, 2020

Edited by Ben Martynoga

The right of Paul Nurse to be identified as the author of this work has been asserted in accordance with the Copyright, Designs and Patents Act 1988.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Arabic Copyright © 2020 by Arab Scientific Publishers, Inc. S.A.L

الطبعة الأولى: آب/أغسطس 2020 م - 1442 هـ

ردمك 978-614-02-3911-1

جميع الحقوق محفوظة للناشر



يمنع نسخ أو استعمال أي جزء من هذا الكتاب بأية وسيلة تصويرية أو الكترونية أو ميكانيكية بما فيه التسجيل الفوتوغرافي والتسجيل على أشرطة أو أقراص مقروءة أو بأية وسيلة نشر أخرى بما فيها حفظ المعلومات، واسترجاعها من دون إذن خطي من الناشر.

إن الآراء الواردة في هذا الكتاب لا تعبر بالضرورة عن رأي الدار العربية للعلوم ناشرون ش.م.ل

تصميم الغلاف: **علي القهوجي**

التنضيد وفرز الألوان: **أبجد غرافيكس**، بيروت - هاتف 785107 (9611+)

الطباعة: **مطابع الدار العربية للعلوم**، بيروت - هاتف 786233 (9611+)

الإهداء

إلى آندي مارتينوغا Andy Martynoga (Yog)
الصديق والأب

وإلى أحفادي:
زو Zoe، وجوزيف Joseph، وأوين Owen،
وجوشوا Joshua

وجيلهم الذي يجب عليهم الاهتمام بالحياة على كوكبنا

المحتويات

المقدمة

ربما كانت فراشةٌ وراء اهتمامي الجَادّ الأول بعِلم الأحياء. كان الفصلُ ربيعًا، وربما كنتُ في السنة الثانية عشرة أو الثالثة عشرة من عمري. كنتُ جالسًا عندما طارتْ أمامي فراشةٌ صفراء مرتعِشة عبر السياج. دارتْ قليلًا وخَفقَتْ بجناحيها ثم وقفتْ لحظةً عابرةً ولكنها كانت كافية لكي ألاحظ العروق الدقيقة الواضحة والنقاط المختلفة في جناحيها. وفجأة أثارَها ظِلٌّ عابِر فطارتْ ثانية واختفتْ خلفَ السياج المقابل. دفَعتْني تلك الفراشةُ ذات الشكل المثالي المعقّد إلى التفكير، فقد كانت مختلفةً عني تمامًا ولكنها مألوفةٌ بطريقة ما في الوقت نفسه. كانت حَيّة مثلي بشكلٍ واضح، فهي تستطيع الحركة والإحساس والاستجابة، كانت مَشحونةً بالقَصد والهَدف. وجدتُ نفسي أفكّر: ما الذي يَعنيه فعلًا أن تكون حَيًا؟ أو باختصار، ماهي الحياة؟

استغرقَني التفكير في هذا السؤال طوال حياتي تقريبًا، ولكن التَّوصل إلى إجابة مقنِعة مريحَة ليس سَهلًا. ربما يثير الدهشة عدم وجود تعريف قياسي للحياة على الرغم من أن العلماء قد تعامَلوا مع هذا السؤال على مَرِّ العصور. حتى عنوانُ هذا الكتاب، "ما هي الحياة؟" مأخوذٌ دون خَجَل مِن عالِم الفيزياء الشهير إيروين شرودنغر Erwin Schrödinger الذي نشَرَ كتابًا مهمًّا بهذا العنوان سنة 1944. كان تركيزه الرئيسي على جانب واحد مهمّ في الحياة: كيف تُحافِظُ الكائنات الحيّة على هذه الدرجة العالية من النظام المدهِش بشكلٍ متماثل جيلًا بعد جِيل في كَونٍ يتَّجِهُ باستمرار نحو الاضطراب والفوضى حسب القانون الثاني في عِلم الدِّيناميكا الحَرارية Thermodynamics؟ كان شرودينغر مُحِقًّا جِدًا في اعتبار هذا الأمر سؤالًا كبيرًا ومهمًّا. واعتَقدَ بأنَّ فَهمَ الوراثة هو المفتاح (ما هي المُوَرِّثات؟ وكيف تَنتَقلُ بدقّة وأمانَة بين الأجيال؟).

أطرَحُ السؤالَ نفسه في هذا الكتاب، ما هي الحياة؟ ولكنني لا أعتقد بأن فَهمَ الوراثة سيعطينا الإجابة الكاملة، وبدلًا عن ذلك سأناقِش خمسة مواضيع رئيسية في عِلم الأحياء وسأستَخدِمَهما كدَرجاتٍ نستطيع صعودها واحدةً تِلوَ الأخرى لكي نتوصَّل إلى رؤية أوضح عن كيفية عمل الحياة. هذه الأفكار ليست جديدة، وهي مقبولة بشكل عام في معرفة وظائف الكائنات الحية، إلا أنني سأعالِجُ هذه الأفكار والمواضيع مع بعضها بعضًا بطرق جديدة، وسأستَخدِمها لتطوير مجموعة من المبادئ الموحِّدَة التي تُعرِّفُ الحياة. آملًا أنها ستمكّنكَ من رؤية عالَم الأحياء بعَينٍ جديدة.

يجب أن أقول منذ البداية أننا نحن علماء الأحياء نتَجنَّبُ الحديثَ عن الأفكار الكبيرة والنظريات الشاملة. ونحن من هذه الناحية نختلفُ عن الفيزيائيين. نُعطِي الانطباعَ أحيانًا بأننا أكثر ارتياحًا بغَمرِ أنفسِنا في التفاصيل والتصنيفات والوَصف سواءً كان في ذِكرِ جميع الأنواع الموجودة في مَوطِنٍ معيَّنٍ، وسَردُ عَدد الأشعار على رجلِ خنفساء، أو كَشف تسلسل آلاف المُوَرِّثات. ربما نبدو كذلك بسبب التنوع المُذهِل، بل الساحِق الذي يَجعَل من الصعب علينا البحث عن نظريات بسيطة أو أفكار شاملة. ولكن أفكارًا شاملة من هذه النوع موجودة في عِلم الأحياء وهي تساعِدنا على إدراك الحياة بكل تعقيداتها.

الأفكار الخَمس التي أريدُ شَرحَها لكَ هي: "الخلية"، "المُوَرِّثَة، (الجين)"، "التطور بالانتقاء الطبيعي"، "الحياة كيمياء"، "الحياة معلومات". بالإضافة إلى شَرحِ مَصدَر هذه الأفكار، وما هي أهميتها، وكيف تتفاعل مع بعضها بعضًا، أريدُ أن أُظهِر لكَ أنها مازالت تتغير ويتم تطويرها هذه الأيام بينما يُتابِعُ علماءٌ في كافة أنحاء العالم التوصلَ إلى اكتشافات جديدة. كما أريدُ أن أمنحكّ تَذوّقَ ما يَعنيه الانغِماسُ في البحث العلمي، ولذا سأعرّفكَ على العلماء الذين توصّلوا إلى هذا التقدم، وأعرِفُ بعضَهم شخصيًا. كما سأخبركَ قصصًا عن تجاربي الخاصة في البحث المخبري مثل الحَدس والإحباط والحظ واللحظات النادرة المثيرة في اكتشاف رؤيةٍ جديدة أصلية. هدفي لكَ هو أن تشاركَ في فَرَحِ الاكتشاف العلمي ومعايَشة الإحساس بالرّضى الذي يأتي من خلال التوصّل إلى فَهمٍ أفضَل للعالَم الطبيعي.

يَضغَطُ النشاط الإنساني على البيئة وعلى كثير من النظم البيئية التي تَدعَمها، ويَصِل بها إلى أقصى درجات التَّحمل أو ربما ما بَعدها. ولكي نحافِظ على الحياة كما نَعرفها، سنَحتاج إلى جميع الأفكار التي نستطيع الحصول عليها في دراسة عالَم الأحياء. وهذا هو سبب أن عِلم الأحياء في

السنين والعقود القادمة سَيوجِّهُ اختياراتِنا بشكلٍ متزايد في أمورٍ مثل: كيف يعيش الناس، وكيف يولَدون ويأكلون، وكيف تتم حِمايتهم وشفاؤهم من الأوبئة والجائحات. سأصِفُ بعض تطبيقات المعارف البيولوجية والاختيارات الصعبة، والشكوك الأخلاقية، واحتمال حدوث نتائج غير متوقَّعة. ولكن، قبلَ الانضمام إلى الجَدَلِ المُتَنامي الذي يحيط بهذه المواضيع، يجب علينا التساؤل أولًا: ما هي الحياة؟ وكيف تعمل؟

نعيشُ في كَونٍ واسِعٍ مُذهِلٍ مثير للإعجاب والدهشة، ولكن الحياة التي تنمو وتزدهر هنا في زاويتِنا الصغيرة من ذلك الكَون الهائل هي واحدةٌ من أكثر جوانِبِهِ إثارةً وغموضًا. ستَعمَلُ المواضيعُ الخَمسة في هذا الكتاب مثل دَرجات السلّم التي تتجه صعودًا بالتدريج لتوضّح مبادئ ومفاهيم تُعرِّفُ الحياةَ على كوكب الأرض. سيُساعدنا ذلك أيضًا على التفكير في كيف بدأت الحياة على كوكبنا؟ وكيف يمكن أن تكون لو شَهِدناها في مكانٍ آخر في هذا الكَون. مهما تكن نقطة بدايتكَ، وحتى لو ظننتَ أنكَ تَعرف شيئًا قليلًا عن العِلم أو لا تَعرف شيئًا على الإطلاق، فإن قصدي من هذا الكتاب هو أنكَ عندما تَنتَهي من قراءتِه ستتكَون لديكَ فكرة عن ارتباطكَ معي ومع تلك الفراشة الصفراء اللطيفة ومع كل شيء حَيٍّ على هذا الكوكب.

أرجو أن نصبح معًا أقربَ إلى فَهم ما هي الحياة.

1 – الخَليَّة
ذَرَّةُ عِلم الأحياء

شاهدتُ أول خلية في حياتي عندما كنتُ في المدرسة بعد فترة قصيرة من رؤيتي للفراشة الصفراء. زَرَعنا في الصَّف نباتات بَصَلٍ صغيرة وضَغَطنا جُذورَها على شريحة زجاجية لكي نفحَص تركيبها تحت المجهر. شرَحَ أستاذُنا الرائع كيث نيل Keith Neal أننا سنُشاهد خلايا، الوحدات الأساسية للحياة. وهاهي الآن أمامَنا: صفوفٌ مرتَّبَة من خلايا تُشبِهُ العُلَبَ منَسَّقةً في أعمِدةٍ منتَظَمة. كم كان مثيرًا للإعجاب أنّ نمو وتكاثر هذه الخلايا الصغيرة يكفي لدَفعِ جُذور البَصَل داخل التربة ليَمنَح النباتَ النَّامي الماء والغذاء والثَّبات.

ازدادَ شعوري بالإعجاب والدهشة عندما تعلمتُ أكثر عن الخلايا. هناك تَنوعٌ كبير جدًا في أشكال وأحجام الخلايا. أغلبُ الخلايا صغيرة ولا يمكن رؤيتها بالعَين المُجَرَّدَة لأنها مُتناهِية في الصّغر فِعلًا. فمثلًا، هناك نوعٌ من الجراثيم التي تُصيبُ المَثانة البولية لو تَجَمَّعَ مَعَنا 3000 خليةٍ فوق بعضها بعضًا لما بَلَغَ ارتفاعها ميليمترًا واحدًا. ولكن، لو تناولتَ بيضةً على الإفطار في الصباح، فَكِّرْ بحقيقة أنَّ صَفارَها بكامله هو خليةٌ واحدة فقط. هناك خلايا ضَخمة أيضًا في أجسامنا، فمثلًا إنَّ خليةً عصبية واحدة يمكن أن تَمتدَّ من قاعدةِ عَمودِكَ الفِقَري إلى رأس الأصبُع الكبير في قَدَمِكَ، أي أنَّ مِثلَ هذه الخلايا قد يَبلغ طولها حوالي المِتر!

يُدهِشُنا هذا التنوع الكبير، إلا أن أكثر ما يُثير اهتمامي هو ما تَشتَرِكُ فيه جميع الخلايا. يَهتمُّ العلماء دائمًا بمعرفة الوحدات الأساسية، وأفضَل مِثال على ذلك هو الذَّرَّة التي تُشكِّلُ الواحدةَ الأساسية للمادة. الذَّرَّة بالنسبة لعِلم الأحياء هي الخلية. فالخلايا هي وحدات البناء الأساسية لجميع الكائنات الحَية، وهي الوحدات الوظيفية الأساسية للحياة. ما أقصدُهُ بذلك هو أن الخلية هي أصغر كائنٍ يمكن أن يتمتَّع

بالخصائص الجوهرية للحياة، وهذا هو أساسُ ما يُسميه علماءُ الأحياء: النظرية الخَلَوية *Cell Theory*: حَسبَ معارِفِنا فإن كل كائنٍ حَيٍّ في كوكب الأرض يتألف من خليةٍ أو من مجموعةِ خلايا. الخليةُ هي أبسَطُ شيءٍ يُمكِنُ أنْ يوصَفَ بأنه حَيٌّ.

عُرِفَت النظرية الخَلَوية منذ حوالي قَرن ونصف، وقد أصبَحتْ واحدةً من الأسس المهمّة في عِلم الأحياء. بالنظر لأهمية هذه الفكرة في فَهم عِلم الأحياء أستَغربُ أنها لم تَستَحوِذ على خيالِ الناس أكثرَ مما حَظِيَتْ به. ربما يَرجِع ذلك إلى أن أغلب الناس قد تعلَّموا في دروس عِلم الأحياء في المدرسة أن يفكِّروا بالخلايا على أنها بكل بَساطَة هي لَبِناتُ البِناء في كائناتٍ أكثر تعقيدًا بكثير، بينما الحقيقة أكثرُ إثارَةً من ذلك بكثير.

بَدأتْ قصةُ الخلية سنة 1665 بالعالِم روبرت هوك Robert Hooke الذي كان عضوًا في الجمعية المَلَكية في لندن التي كانت حديثةَ التأسيس وهي من أوائل الجمعيات العلمية في العالَم. ومثلما تجري الأمور في العِلم عادة، فقد أدَّتْ تقنيةٌ علمية جديدة إلى اكتشافِه. بما أن معظم الخلايا صغيرة جدًا ولا تُرى بالعَين المُجَرَّدَة فقد كان على اكتِشافِها أن يَنتَظِر حتى يتم اختراع الميكروسكوب (المجهر) في بداية القَرن السابع عشر. غالبًا ما يكون العلماء مزيجًا من النظريين والمِهنيين الماهِرين، وقد كان العالِم هوك كذلك حقًا، فقد كان مرتاحًا تمامًا في اكتشاف آفاقِ الفيزياء أو العَمارة أو عِلم الأحياء مثلما كان مرتاحًا في اختراع أدوات علمية. صَنَعَ ميكروسكوبَه الخاص واستَعمَله في دراسة العَوالم الغريبة المُختَبِئة وراء ما تراه العَين المُجَرَّدَة.

أَحَدُ الأشياء التي نَظَرَ إليها هوك تحت المجهر كانت شريحةً رقيقة من الفَلِّين، واكتَشَفَ أن خَشبَ الفَلِّين يتألف من صفوفٍ متتالية كثيرة من كهوفٍ ذات جدران تشبه خلايا جَذر البَصَل التي شاهدتُها عندما كنتُ طالبًا بعد ثلاثمئة سنة. أطلَقَ هوك على تلك الحجرات الصغيرة اسم "الخلايا" المُشتَقّ من الكلمة اللاتينية *cella* التي تعني حُجرة صغيرة أو مُكعَب. لم يَعرِف هوك آنذاك أنَّ الخلايا التي رسَمَها كانت في الحقيقة العنصُر الأساسي في بِناء النباتات، بل في بِناء جميع الكائنات الحَية.

خلايا الفلّين تحت تكبير المجهر كما رسمها روبرت هوك 1665



بعد فترة قصيرة من ملاحَظَة هوك، قدَّمَ الباحثُ الهولندي أنتون فان ليڤنهوك Anton van Leeuwenhoek ملاحظةً أخرى حاسِمة عندما اكتَشَفَ كائناتٍ حَيّة تتألف من خليةٍ واحدة، فقد شاهَدَ تلك الكائنات الحَيّة المجهرية وهي تَسبح في عَيِّنَة من الماء أَخَذَها من بُقعَة من الوَحل، كما شاهَدَها تَنمو في لُطاخَةٍ مَسَحَها على أسنانه. أثارَتْ هذه الملاحظات قَلَقَهُ لأنه كان فخورًا بنظافَةِ أسنانه! مَنَحَ تلك الكائنات الدقيقة اسمًا جريئًا لم نَعدْ نَستَخدِمهُ هذه الأيام وهو "الحيوانات الدقيقة"، وكانت تلك الكائنات الدقيقة التي شاهَدَها تتكاثرُ بين أسنانه أولى الجراثيم التي وصِفَتْ في التاريخ. وقَعَ ليڤنهوك مصادَفةً على حَقلٍ جديد تمامًا من الكائنات الحَيّة التي يتألف كل منها من خلية واحدة.

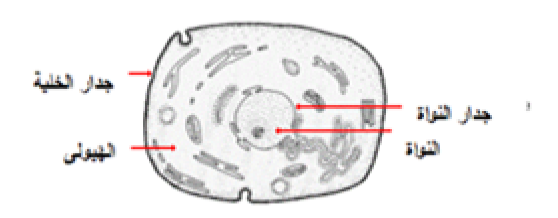
نَعرِفُ الآن أن الجراثيم وغيرها من الخلايا الميكروبية (الميكروب هو اسمٌ عام لجميع الكائنات المجهرية التي تستطيع العيش كخلية واحدة منفردة)، ونَعرفُ أنها أكثر أشكال الحياة عددًا في كوكب الأرض، وأنها تعيش في جميع الظروف البيئية من أعلى طبقات الغلاف الجوي إلى أعماق القشرة الأرضية، وبدونها تتوقَّف الحياة فهي تُفَكِّكُ الفَضَلات، وتُغنِي التربة، وتُعيد انتاج المواد المغذية، وتُثبِّت نيتروجين الهواء الذي تحتاج إليه النباتات والحيوانات لكي تنمو وتعيش. وعندما يَنظُر العلماء إلى أجسامِنا نحن البَشَر يشاهدون أنَّ مقابل كل خلية من خلايا الجسم التي يَبلغ عددها حوالي 30 ترليون خلية أو أكثر، هناك خلية ميكروبية واحدة على الأقل. فأنتَ وكل إنسان لستَ وحدَكَ ككائن منفَرد منعَزل، بل إن كل جِسمٍ بَشَري يتألف من مستعمَرةٍ هائلة من الخلايا البشرية وغير البشرية التي تتغير باستمرار. تعيش هذه الخلايا من الجراثيم والفطور المجهرية على سطح جسمِنا وفي داخِلِه وتؤثِّر على هضم الطعام ومقاومة الأمراض.

ولكن قَبلَ القَرن السابع عشر لم يكن لدى أي أحد فكرة حتى عن وجود هذه الخلايا غير المَرئية، فكيف بأنها تعمل وفقَ المبادئ الأساسية ذاتها التي تَعمَل وفقَها جميع الخلايا الحية؟!

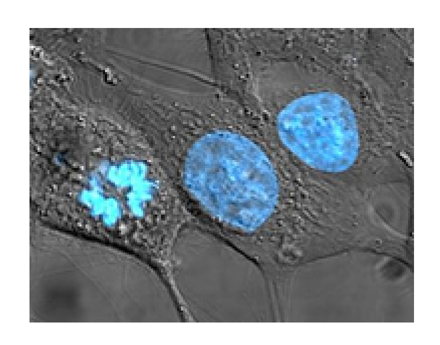
خلال القَرن الثامن عشر وفي بدايات القَرن التاسع عشر تَحسَّنتْ أجهزةُ الميكوسكوب وتقنياتها، وسرعان ما تمكَّن العلماء من تمييز الخلايا من بين جميع الكائنات الأخرى. بدأ بعضُهم يتوقَّعُ أن جميع النباتات والحيوانات تتألف من تَجمُّعٍ لهذه الخلايا الدقيقة التي وصَفَها ليڤنهوك قَبلَهم بأجيال عديدة. وبعد فترة طويلة من التأمل والبحث ولِدَتْ أخيرًا النظرية الخَلَوية. في سنة 1839، لَخَّصَ عالِمُ النباتات ماتياس شلايدن Matthias Schleiden وعالِم الحيوان ثيودور شوانTheodore Schwann أبحاثهما وأبحاث كثير لغيرهما وكتَبا: "رأينا أن جميع العضويات تتألف أساسًا من أجزاء هي الخلايا". وصَلَ العِلم أخيرًا إلى الاستنتاج المُنير بأن الخلية هي واحدة البُنيَة الأساسية لجميع الكائنات الحَيّة.

تَعمَّقَتْ نتائجُ هذه الرؤية عندما لاحَظَ علماءُ الأحياء أن كل خلية هي شكلٌ من أشكال الحياة في حَدِّ ذاتها. أدركَ هذه الفكرة رائِدُ عِلم الباثولوجيا رودولف فيرشوف Rudolf Virchow عندما كتَبَ سنة 1858 "يبدو أن كل حيوان هو مَجموعُ وحداتٍ حَيَّةٍ تَحمِلُ كل منها بذاتها الصفات الكاملة للحياة".

يعني ذلك أن جميع الخلايا هي كائناتٌ حَيّة في حَدِّ ذاتها. يُظهِرُ علماءُ الأحياء ذلك بشكلٍ واضح عندما يأخذون خلايا من أجسام حيوانات أو نباتات كثيرة الخلايا ويَحتَفظون بها حَيَّة في أوعية زجاجية أو بلاستيكية ذات أرضية مسطَّحَة عادة تسمى أطباق بتري Petri. بعضُ سلالات هذه الخلايا مازالت تعيش وتنمو في مخابر بكثير من أرجاء العالَم فترة عُقودٍ من الزمن. تُتيحُ هذه الخلايا للعلماء فرصةَ دراسة العمليات الحيوية دون الحاجة للتعامل مع تعقيدات الكائنات الحَيّة الكامِلة. الخلايا نشيطةٌ، وتستطيع الحركةَ والتفاعل مع الظروف البيئية، كما أن محتوياتها متحرِّكَة باستمرار. ربما تبدو الخلايا بسيطةً بالمقارنة مع العضويات الكاملة مثل الحيوانات والنباتات، إلا أنها حَيَّة بكل تأكيد.



رسم توضيحي للخليّة



صورة لبعض الخلايا بعد تلوين النواة، وتَظهر نواة الخليّة اليسرى
في حالة الانقسام والتكاثر

بَقِيَتْ ثَغرةٌ مهمّة في النظرية الخَلَوية بشكلِها الذي وضَعَهُ شلايدن وشوان لأنها لم تَصِفْ مِنْ أين تأتي الخلايا الجديدة. أُغلِقَتْ هذه الثَّغرة عندما أدركَ علماءُ الأحياء أن الخلايا تتكاثر بانقسام كل خليةٍ إلى خليتَين، واستَنتَجوا أنَّ الخلايا لا تَنشَأ إلا مِن انقسِام خلايا سبَقَتْها. نَشَرَ فيرشوف هذه الفكرة بجملة لاتينية: "*Omnis cellula e cellula*" أي أن جميع الخلايا تَنشَأ من خلايا. ساعَدَتْ هذه الجملة أيضًا على نَقضِ الفكرة الخاطِئة التي مازالت منتَشرة لدى البعض حتى الآن، أنَّ الحياة تَنشَأ دائمًا بشكلٍ ذاتِيّ من مادةٍ غير حَيّة، وهذا غير صحيح.

انقسام الخلية هو أساس النمو والتطور لجميع الكائنات الحية، وهو أول خطوة حَرِجَة في الانتقال من خليةِ بويضةٍ ملقَّحَة واحدةٍ لحيوانٍ ما، إلى كُرَةٍ من الخلايا، ثم في النهاية إلى كائن حَيٍّ كثير التعقيد والتنظيم هو الجَنين. يَبدأ ذلك كله من خلية واحدة تَنقَسم وتُنتِج خَليتَين تَتطَور فيهِما هوياتٌ مختلفة. جميعُ مراحل تَطَور الجَنين التي تَحدُث بعد ذلك تؤسّس على هذه العملية ذاتِها بشكلِ دَورات متتالية من انقسام الخلية، يَتلوها نُشوء جَنينٍ بأنماط مختلفة أكثر تفصيلًا عندما تَنمو الخلايا وتَتخَصَّص في نُسُجٍ وأعضاء أكثر تَخصُّصًا. يَعني ذلك أن جميع الكائنات الحَيّة بِغَضِّ النَّظر عن حَجمها وتعقيدها تَنشَأ من خلية واحدة. أعتَقدُ بأننا جميعًا سنَحتَرِم الخلايا أكثر قليلًا إذا تَذكَّرنا أنَّ كلَّ واحِدٍ منّا كان خليةً واحدة ذات يوم تشكَّلَتْ من اتحاد نُطفَة ببُوَيضَة في لَحظَة التلقيح.

يفسّر انقسام الخلية أيضًا الطرق التي تبدو معجزةً في شفاء الجسم بنفسه. إذا جرحتَ نفسكَ بِحَدِّ هذه الصفحة، فإن انقسام الخلايا المَحَلي حَول الجرح هو الذي يؤدي لشفاء الجرح ويحافِظ على سلامة الجسم. غير أن السرطانات لسوء الحظ هي النقيض لقدرة الجسم على تحريض دَوراتٍ جديدة

من انقسام الخلية. إذ يَنشأ السرطان بسبب نمو غير منضَبط وانقسام للخلايا يستطيع الانتشار بشكلٍ خبيث يؤدي إلى الضرر وربما إلى الوفاة.

النمو والشفاء والتَّنَكُّس والسرطانات كلها تتعلق بتغيّر في صفات خلايا أجسامنا في المرض والصحة وفي الشباب والشيخوخة. في الحقيقة، يمكن إرجاع معظم الأمراض إلى خَلَل في الخلايا، وإن فَهم ما يَحدث من خَلل في الخلايا يوجِّهُ كيفية تطوير طرق جديدة لعلاج المرض.

تُتابِع النظريةُ الخلوية التأثير في تَوجُّه الأبحاث في علوم الحياة والممارَسات الطبية، كما أنها رسَمتْ خطَّ حياتي كذلك، فمنذ أن نظرتُ في المجهر إلى جذور البصَل عندما كان عمري ثلاث عشرة سنة أصبحتُ مُحبًّا للاطلاع على الخلايا وكيفية عملها. وعندما أصبحتُ مدرِّسًا لعِلم الأحياء، قرَّرتُ دراسةَ الخلايا، خاصة كيف تتكاثر وكيف تُسيطِر على انقساماتها.

في السبعينيات، عمِلتُ على خلايا الخَميرة التي يظُنُّ معظم الناس أنها لا تُصلِح سوى لصُنع الخَمر أو البيرة أو الخبز، وليس لمتابعة المسائل البيولوجية الأساسية. غير أنها في الحقيقة نماذجَ رائعة لفَهم كيفية عمَل الخلايا في الكائنات الأكثر تعقيدًا. الخَميرةُ هي نوعٌ من الفطور ولكن خلاياها تُشبه كثيرًا خلايا النباتات والحيوانات، وهي كذلك صغيرة وبسيطة نسبيًا، وتستطيع النمو بسرعة وبشكلٍ غير مُكلفٍ لأنها تتغذى على مواد بسيطة. نَزرعُ خلايا الخَميرة في المختبرات إما بحالة طَفو حُرٍّ في حِساء سائل أو فوق طَبقَة من الهُلام في طَبَق بتري بلاستيكي حيث تشكِّلُ مستعمرات لونُها مصفَرّ قليلًا وقطرها بضعة ميليمترات تَضمُّ كلّ منها ملايين الخلايا. على الرغم من بساطَتِها، أو ربما بسبب ذلك، فقد ساعدَتْنا خلايا الخَميرة على فهم كيفية انقسام الخلايا في معظم الكائنات الحَية، بما فيها الخلايا البشرية. وإنّ كثيرًا من معلوماتنا عن الانقسام غير المنضَبِط للخلايا السرطانية إنما جاء أصلًا من دراسة خلايا الخَميرة المتواضِعة.

الخلايا هي الوحدات الأساسية للحياة، وهي كائناتٌ منفردة حَية يحيطُ بكلٍّ منها غِشاءٌ مَصنوع من مواد دهنية. ولكن مثلما أنّ في الذَّرات بروتونات وإلكترونات، فإنّ في الخلايا مُكَوِّنات أصغَر منها كذلك. مَجاهِرُ هذه الأيام قوية جِدًا في التكبير ويَستخدِمها علماءُ الأحياء في كَشفِ الهياكل المعقَّدة الموجودة في داخِلها، وهي جميلة جِدًا في بعض الأحيان. تُسمّى أكبر هذه الهياكل "العُضَيَّات أو الأعضاء الصغيرة" التي يُحيطُ بكلٍّ منها غشاءها الخاص بها. أهمّ هذه الأعضاء الصغيرة هي النواة *Nucleus* التي تمثِّل مَركز التَّحَكُّم والسَّيطَرة في الخلية لأنها تحتوي على الأوامر الوراثية المسجَّلة

في الصِّبغِيَّات (الكروموزومات *Chromosomes*). أما الميتوكوندريات *Mitochondria* فتَعمَل مثل مَحطاتٍ صغيرة لتوليد الطاقة، وهناك مئات منها في بعض الخلايا تَمدُّ الخليةَ بالطاقة التي تحتاجها للنمو والحياة. وهناك أنواع مختلفة أخرى من المُحتَويات والحُجرات داخل الخلايا تقوم بوظائف لوجستية معقَّدة مثل بِناء أو تحطيم أو إعادة تدوير أجزاء من الخلية، بالإضافة إلى نَقل مواد إلى داخل الخلية وإلى خارجها ونَقلها بين مناطق مختلفة داخل الخلية.

لا تتألف جميع الكائنات الحَية من خلايا تحتوي على جميع هذه الأعضاء الصغيرة وهذا التكوين الداخلي المعقّد، ولكنّ وجودَ أو عدم وجود نَواة يقسِّم أنواع الكائنات الحَية إلى فرعَين كبيرَين، فالكائنات الحَية التي تحتوي خلايا أجسامها على نواة تسمى "حقيقيات النواة *Eukaryote*" مثل الحيوانات والنباتات والفطور، أما التي لا تحتوي على نواة فتسمى "بدائيات النواة *Prokaryotes*، مثل البكتيريا*Bacteria* والجراثيم القديمة *Archaea*. تبدو الجراثيم القديمة مشابِهةً للبكتيريا من حيث الحَجم والتكوين إلا أنها في الحقيقة أقارب بعيدة لها، ولكن بعض وظائفها الجزيئية أكثر شبهًا لحقيقيات النواة أمثالنا نحن البشر من قريباتها البكتيريا.

سواءً كانت الخَلية من بدائيات أو من حقيقيات النواة فهناك جزء مهمّ منها هو غشاءها الخارجي (جِدار الخلية)، فعَلَى الرغم من أنَّ سَماكَتَهُ لا تَتجاوز سَماكَةَ جُزَيئَين، فإن هذا الغلاف الخارجي يشكِّل "جِدارًا" مَرِنًا أو حاجِزًا يفصِل كل خلية عما حولها من بيئة، ويحدِّد ما هو "داخل" أو "خارج" الخلية. وهذا الحاجزُ مَصيرِيٌّ من الناحية الفلسفية والعَمَلية. فهو يفسِّر في النهاية لماذا تقاوم أشكالُ الحياة بنجاح الاتجاه العام في الكون نحو الاضطراب والفوضى. تستطيع الخلايا أن تؤسِّسَ داخل غشائها العازل وتمارِسَ النظام التي تحتاجه لكي تَعمَل في داخلها بينما تَصنَعُ الفوضى في محيطها المَحَلي خارجها في الوقت نفسه، وبذلك لا تُخالِف الحياةُ القانونَ الكَوني العام الثاني في الديناميكا الحرارية.

تستطيع جميع الخلايا أن تَشعُر بالتغيرات في حالتها الداخلية وتَستَجيب لها، وكذلك بتَغيّرات العالَم من حولِها. وهكذا، على الرغم من انفِصالها عن البِيئة التي تَعيشُ فيها، إلا أنها على اتصال مباشر بما يُحيط بها. كما أنها نشيطةٌ باستمرار وتَعمل دائمًا للمحافَظة على أحوالها الداخلية التي تَسمَح لها بالحياة والنمو. تَشتَرِكُ في هذا مع الكائنات الحَية الأكثر ظُهورًا مثل الفراشة التي راقبتُها في طفولتي، أو مثلنا جميعًا.

في الحقيقة تَشتَركُ الخلايا بكثير من الصفات مع جميع أنواع الحيوانات والنباتات والفطور، فهي تنمو وتتكاثر وتُحافِظ على نفسها، وخلال قيامِها بكل هذه الوظائف فهي تُبدي نَوعًا من القَصد: إلحاحٌ على الاستمرار والبقاء على قَيدِ الحياة، والتكاثر في أي ظَرف تواجِهه. جميع الخلايا، من البكتيريا التي وجَدَها ليڤنهوك بين أسنانه، إلى الخلايا العَصَبية التي تَسمح لكَ بقراءة هذه الكلمات تَشتَركُ كلها بهذه الصفات مع كافة الكائنات الحَية، وإن فَهمَ كيفية عمل الخلية يُقرّبُنا من معرفة كيف تعمل الحياة.

تُعتَبر المُوَرِّثات جوهريةً وأساسية في وجود الخلية، وهي ما ستَتَحول إليه فيما يلي، فهي تعليمات التَّرميز التي تَستَخدِمها كل خلية في بِناء وتَنظيم نفسِها، ويجب أن تُمَرَّرَ هذه التعليمات إلى كل جيلٍ جديد عندما تتكاثر الخلايا والكائنات الحَية.

2 - المُوَرِّثَة (الجِين)

اختبار الزمن

لديَّ بنتَان وأربعةُ أحفاد، وكلٌّ منهم فريدٌ بطريقةٍ رائعة. فمَثلًا، سارة، إحدى بناتي هي منتِجَة تلفزيونية، والثانية إميلي بروفسورة في الفيزياء، غير أن هناك صفات تَشتَركان بها هما وأولادهما معي أنا وزوجتي آن، قد يكون الشَّبهُ العائلي قويًا أو خَفِيًا في الطول ولون العيون وانحناءة الفَم أو الأنف أو حتى في سلوكٍ معيَّن أو بتَعبيرات الوَجه. هناك تَنويعاتٌ كثيرة أيضًا، ولكن الاستمرار عبر الأجيال موجودٌ دون شك.

وجودُ تشابه بين الوالدَين والنَّسل هو صِفة واضِحة في جميع الكائنات الحَية. لاحَظَ ذلك أرسطو وغيره من المفكّرين الكلاسيكيين القدماء منذ زمن بعيد. ولكن الأساس البيولوجي للوراثة ظَلَّ لغزًا غامضًا عنيدًا. طُرِحَتْ تفسيراتٌ مختلفة على مَرِّ السنين، يبدو بعضُها غريبًا هذه الأيام. فمثلًا، ظَنَّ أرسطو أنّ الأم فقط هي التي تؤثِّر على تطور أجِنَّتِها بالطريقة نفسها التي تؤثِّر فيها صِفاتُ تُربَةٍ معيَّنَة على نمو النباتات من البذور التي تُزرَع فيها. ظَنَّ بعضُهم أن التفسير هو "اختلاط الدم" وفكرة أن الأولاد يَرثون مَزيجًا متوسطًا من صفات الأبوَين.

احتاج الأمر إلى اكتشاف المُوَرِّثات لكي يُفسَحَ المَجال أمام فَهمٍ أكثر واقعية لكيفية عمل الوراثة. إذ تُقَدِّمُ المُوَرِّثات طريقةً تُساعِد على فَهمِ المَزيج المعقَّد من التشابه والصفات الفريدة التي تَنتَقل في الأسرة، كما أنها المَصدَر الأساسي للمعلومات التي تَستخدِمها الحياة في بِناء الخلايا والمحافَظة عليها وتَكاثرها، وبالتالي فِعلُ ذلك أيضًا في الكائنات الحَيَّة التي تتألف من خلايا.

كان غريغور مَندِل Gregor Mendel رئيسَ دَير برنو Brno Monastery في شمال جمهورية التشيك الآن، وكان أول شَخصٍ يتوصَّل إلى بعضِ الفَهم في فَكِّ أسرار الوراثة، غير أنه لم يتوصَّل إلى ذلك بدراسة نمَط الوراثة المُحَيِّر غالبًا في عائلات الإنسان، بل عَمِدَ بدلًا عن ذلك إلى إجراء تجارب دقيقة على نباتات البازلاء وتطوير الأفكار التي قادَتْ في النهاية إلى اكتشاف الأمور التي نُسميها الآن: المُوَرِّثات.



الأب جريجور يوهان مَندِل Gregor Johann Mendel (1822-1884)
رائد عِلم الوراثة

لم يكن مَندِل الشخص الأول الذي طبَّقَ تجارب علمية في طَرحِ الأسئلة حول الوراثة، ولم يكن الأول في استِخدام نباتاتٍ في البحث عن الأجوبة. كان بعض المزارعين قد وصَفوا كيفية انتقال بعض صِفات النباتات عبر الأجيال بطرقٍ غير متوقَّعة. عند إجراء تلقيح بين والدَين نباتيَّن مختلفَين يَنتُجُ نَسلٌ يبدو أحيانًا وكأنه مَزيجٌ منهما، فمَثلًا، عند تلقيح نباتٍ له أزهار بنفسجية مع نباتٍ آخر من النوع نفسه إنما له أزهار بيضاء، ربما تَنتُجُ نباتاتٌ ذات أزهارٍ وَردِية. ولكن بعض الصِّفات الأخرى تبدو مُسيطِرةً دائمًا في جِيلٍ معيَّن. ففي مثل تلك المواقف يُنتِج التلقيح بين نباتات ذات أزهار بنفسجية، ونباتات ذات أزهار بيضاء نَسلًا جميعُ نباتاتِه ذات أزهار بنفسجية. جَمَعَ الرُّوادُ الأوائل كثيرًا من المَفاتيح المثيرة للاهتمام، ولكن أيًا منها لم يَنجَح في التوصُّل إلى فَهمٍ مريح لكيفية عَمل الوراثة في النباتات، فكيف بعَملها في جميع الكائنات الحَية بما فيها الإنسان؟ وذلك بالضبط هو ما بدأ مندل بتوضيحِهِ في دراسَتِهِ على البازلاء.

في سنة 1981، خلال الحرب الباردة، ذهبتُ في رحلة "حَجٍّ" إلى الدّير الأوغستيني في برنو لزيارة المكان الذي عمل فيه مَندِل قَبل أن يُصبح المَكان السياحي الذي هو عليه هذه الأيام. كانت الحديقة آنذاك مغطّاة بالأعشاب النامية، وكانت كبيرة بشكلٍ مدهش. أستطيع بسهولة أن أتخَيَّل صفوف نباتات البازلاء التي زَرَعها مَندِل ذات يوم هنا. دَرَسَ مَندِل علومَ الفيزياء في جامعة فيينا ولكنه لم ينجَح في التأهل كمُدَرِّس. احتفظَ معه بشيءٍ من دراسَتِه للفيزياء، ومن الواضح أنه أدركَ حاجَتَه لكثيرٍ من البيانات لأن العيّنات الكبيرة أفضَل في كشف أنماط مهمّة. شمَلَتْ بعضُ تجاربِهِ 10000 نبتة بازلاء مختلفة. لم يَقُم أيّ من الباحِثين في عِلم النبات قبله بمثل هذه الأبحاث الدقيقة التي ضَمَّتْ مثل هذه الأعداد الكبيرة.

لتَبسيط تَجاربه رَكَّزَ مَندِل فقط على صفاتٍ تُظهِر فروقًا واضِحة وحاسِمة، وسَجَّلَ على مَدى سنوات نتائج عمليات التهجين التي قام بها ولاحَظ أنماطًا لم يُلاحِظها آخرون. والأهمّ من كل ذلك هو أنه لاحَظَ وسجَّل نِسَبًا عَدَدية مُحدَّدة لنباتات البازلاء التي أظهَرت أو لم تُظهِر صفات محدَّدة مثل لَون الأزهار وشَكل البذور. كان من بين الأمور المهمّة التي قام بها مَندِل هو وَصفُ هذه النّسب بشكلِ سَلاسِل رياضية. قادَهُ ذلك إلى افتراضِ أنّ حَبَّات الطَّلع المذكَّرة والبُويضَات المُؤنَّثَة في أزهار البازلاء تحتوي على أشياءَ أَطلَق عليها اسم "العَناصِر" التي ترتبط بالصفات المختلفة للنباتات، وعندما تلتقي هذه العناصر مع بعضها بعضًا في عملية التلقيح فإنها تؤثِّر على صفات الجِيل التالي لهذه النباتات. إلا أن مَندِل لم يَعرف ما هي هذه العناصر وكيف يمكن أن تَفعلَ ذلك.

بالصدفة المَحضَة، كان عالِمُ أحياءٍ شهير آخر اسمه تشارلز داروين Charles Darwin يَدرُس تَهجينَ نباتٍ آخَر لَه أزهار اسمه نَبتَة أنف العِجل Snapdragons في الوقت نفسه تقريبًا، ولاحَظ نِسَبًا مشابِهة لنِسَب مَندِل إلا أنه لم يُحاول تفسير مَعناها. وعلى كل حال فإن المُعاصِرين لمَندِل قد أهمِلوا أبحاثَه تمامًا، واحتاج الأمر إلى جيل آخر قَبل أن تُؤخَذ على مَحمَل الجدّ عِلميًا.

حوالي سنة 1900، كرَّرَ علماءُ بيولوجيا آخرون بشكلٍ مستقل نتائج أبحاث مَندِل، وطَوَّروها أكثر وبَدؤوا في التوصّل إلى استنتاجات أكثر جرأة في كيفية عمل الوراثة. توصَّلَتْ هذه الأبحاث إلى تطوير ما سُميتْ بنظرية مَندِل في الوراثة تقديرًا لجهوده الرائدة وولادة عِلم الوراثة. وبدأ العالَم الآن بملاحظة ذلك.

تَقتَرح نظريةُ مَندِل في الوراثة أن الصفات المَوروثَة يُحدِّدُها وجودُ جُسَيمات مادية بشكل أزواج. هذه "الجُسَيمات" هي التي سمّاها مَندِل "العناصر"، ونسميها الآن "المُوَرِّثات". لم تتحدَّث نظريةُ مَندِل في الوراثة كثيرًا عن ماهية هذه الجُسَيمات ولكنها وصَفَتْ بدِقَّة كيفية تَوريثِها. ومع الوقت أصبح واضحًا أن هذه الاستنتاجات لا تَنطَبق فقط على البازلاء بل تَنطَبق أيضًا على جميع الأنواع التي تتكاثَر جِنسِيًا، من الخَميرة إلى الإنسان وجميع الأنواع بينهما. كل واحدة من مُوَرِّثاتكَ تُوجَدُ بِشَكلِ زَوجٍ، تَرِثُ واحِدًا منها من أبيكَ والأخر من أمّكَ. تَنتَقل هذه الأزواج من النُّطفة والبويضَة عندما تمتَزجان مع بعضهما بعضًا في لحظة التلقيح.

لم يقف العِلم جامِدًا في الثلث الأخير من القَرن التاسع عشر عندما كانت أبحاث مَندِل مُهمَلة، بل كانت الأبحاث تتوصّل أخيرًا إلى رؤيةٍ أوضَح للخلايا أثناء عملية انقسامها. عندما رُبِطَتْ نتائج هذه الأبحاث مع فرضية جُسَيمات الوراثة المَندِليّة اتَّضَح دور المُوَرِّثات الجَوهَري في الحياة.

كان أحد المفاتيح الأولى هو رؤية أجسام مجهرية داخل الخلايا ظَهرَتْ مثل خيوطٍ دقيقة. كان أول من لاحظَها هو عالِم ألماني حوالي سنة 1870 كان اسمه والتر فليمينغ Walther Flemming وكان طبيبًا عسكريًا تحوَّلَ إلى دراسة عِلم الأحياء واستَخدَم أفضَل المَجاهر المتوفرة في عَصره ووصَف تلك الخيوط المجهرية وهي تتحرك بطريقة مثيرة للاهتمام. عندما تَستعدُّ خليةٌ للانقسام، شاهَدَ فليمينغ هذه الخيوط تنقَسِم طوليًا إلى نصفَين قَبل أن تُصبح أقصَر وأَسمَك. ثم عندما تَنقَسِم الخلية إلى خليتَين، تَنفَصل هذه الخيوط بحيث يَذهب نِصفُها إلى كل من الخليتَين الجديديتَين.

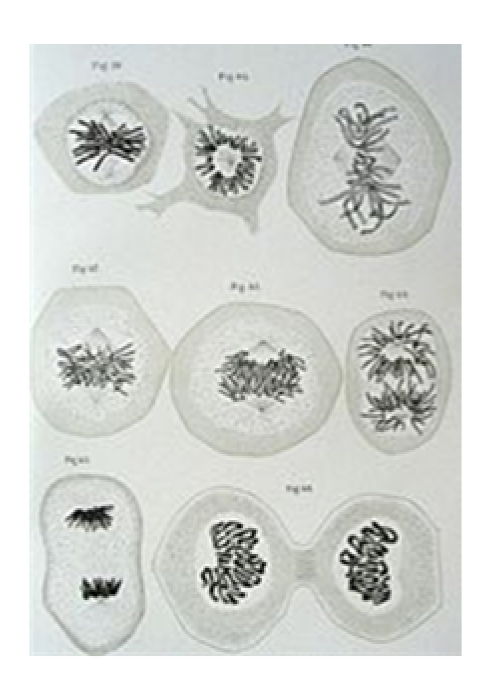
دون أن يدركَ ذلك في حينها، كان فليمينغ يَنظُر إلى التّجسيد المادّي للمُوَرِّثات، جُسَيمات الوراثة التي افترضَتْ وجودَها نظريةُ مَندِل في الوراثة. ما كان مَندِل يُسميها "العناصر" نُسميها الآن "الصّبغيات أو الكروموزومات *Chromosomes*". الصّبغيات هي الجُسَيمات المادية الموجودة في جميع الخلايا والتي تحتوي على المُوَرِّثات.



العالِم الألماني والتر فليمنغ Walther Flemming (1843-1905)



رسم توضيحي للصبغيات في نواة الخليّة
كما نُشر في كتاب فليمنغ 1882



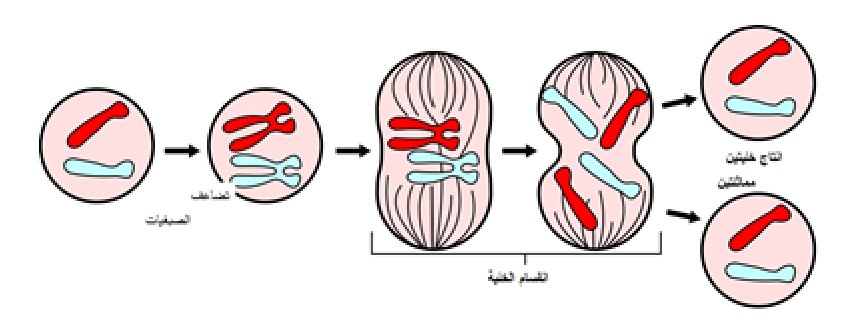
رسم توضيحي لمراحل انقسام الخليّة بطريقة الخيوط المتشابِكة
كما نُشر في كتاب فليمينغ 1882

في ذلك الوقت، اكتُشِفَ مفتاح آخر عن المُوَرِّثات والصّبغيات من مَصدَرٍ غير مُتَوقَّع: البيوض الملقَّحَة للديدان الطفيلية المستديرة. كان عالِم الأحياء البلجيكي إدوارد فان بينيدين Edouard van Beneden يَفحصُ بدقةٍ وتَمحيص المراحل الأولى في تطور الديدان المستديرة، وشاهَدَ في المجهر أن أول خلية لكل جَنين جديد تحتوي على أربعة صبغيات، وأنها حَصَلَتْ بالضبط على اثنَين من البويضَة واثنَين من النُّطفَة.

تطابَقَ هذا تمامًا مع فرضيات نظرية مَندِل في الوراثة: مجموعةُ أزواجٍ من المُوَرِّثات تلتقي في لَحظَة التلقيح. تم تأكيد نتائج فان بينيدين بعد ذلك مرات عديدة. هناك نِصفُ عَدَدِ الصّبغيات في البويضات والنّطاف، ويتشكَّل العَدد الكامل من الصّبغيات عندما تَمتَزِج البويضات بالنّطاف في البويضَة الملقَّحَة. نَعرِفُ الآن أن ما هو صحيحٌ في التكاثر الجِنسي للديدان المستديرة هو صحيحٌ كذلك في جميع أنواع الحياة في حقيقيات النواة، بما فيها البَشَر.

يختلف عدد الصّبغيات بشكلٍ كبير بين الأنواع، إذ تحتوي مثلًا نباتات البازلاء على 14 صبغيًا في كل خلية من خلاياها، بينما يوجَد 46 في خلايا الإنسان، ويوجَد أكثر من 400 في خلايا

فراشة الأطلَس الزرقاء. من حسن حظّ فان بينيدين أنّ الديدان المستديرة لديها أربعة فقط، فلَو كان فيها عددٌ أكبر من الصّبغيات فربما لم يكن يستطيع عَدَّها بسهولة. بالانتباه جيدًا إلى حالة الديدان المستديرة الأسهَل قليلًا أدركَ فان بينيدين حقيقةً عامة عن الوراثة الجِينية (انتقال المُوَرِّثات). يمكن الوصول إلى رؤيةٍ أوسَع وأعمّ لكيفية عمل الحياة انطلاقًا من تجربةٍ يمكن تفسيرها بوضوح في نظامٍ بيولوجي سَهل. ولهذا السبب بالذات قَضَيتُ معظمَ عملي في دراسة خلايا الخَميرة الأبسَط والأسهَل في الدراسة والبحث بدلًا من الخلايا البشرية الأكثر تعقيدًا.



رسم توضيحي للمراحل المتتالية في انقسام الخلايا المتساوي

بوَضعِ اكتشافات مَندِل وفان بينيدين معًا أصبَح واضِحًا أن الصّبغيات تَنقُلُ المُوَرِّثات بين أجيال الخلايا المنقَسِمة وكذلك بين أجيال الكائنات الحَية الكاملة. فيما عدا استثناءات خاصة قليلة، مثل كريات الدم الحمراء التي تَفقد نواتها بكاملها أثناء نُضجِها وبالتالي تَفقد جميع مُوَرِّثاتِها، فإن كل خليةٍ في جسمكَ تحتوي على نسخةٍ كاملة من جميع مُوَرِّثاتكَ. تلعبُ هذه المُوَرِّثات دَورًا كبيرًا في توجيه تطوّر جسمٍ كاملٍ يتكَوَّن من خلية واحدة هي البويضَة المُلقَّحَة. وطوال عمر كل كائنٍ حَيّ تُقدِمُ المُوَرِّثات لكل خليةٍ في جسمِهِ المعلومات الأساسية التي تحتاج إليها لبِناء نفسِها وصيانة حياتِها. وبالتالي، فمَعَ كل انقسامٍ لكل خليةٍ يجب نَسخُ جميع المُوَرِّثات ومُشارَكتِها بالتساوي بين كل خليتَين جديدتَين. وهذا يعني أن انقسام الخلية هو المِثال الأساسي للتكاثر في عِلم الأحياء.

كان التحدي الكبير التالي لعلماء الأحياء هو فَهمُ ما هي المُوَرِّثات وكيف تَعمَل. جاء أول اكتشافٍ مهمّ سنة 1944 عندما قامَتْ مجموعةٌ صغيرة من العلماء في نيويورك بقيادة أوزوالد آفري Oswald Avery بإجراء تجربة كَشَفَتْ تكوينَ المُوَرِّثات. كان آفري ورفاقه يدرسون نوعًا من البكتيريات التي تُسبِّب التهاب الرئة. كانوا يَعرفون أن سلالاتٍ سليمة منها يمكن تحويلها إلى أشكال

مُمرِضَة عند مَزجِها ببقايا خلايا ميتة من سلالة ممرِضَة. المهمّ أن هذا التغيّر كان يمكن أن يورَّث، فما أن تصبح البكتيريات مُمرِضَةً حتى تمرّر هذه الصِفة إلى نَسلها. قادَ ذلك آفري إلى التفكير بأن مُوَرِّثَة أو مُوَرِّثات لا بد من أنها قد انتَقلَتْ ككيانٍ كيميائي من بقايا البكتيريات المُمرِضَة الميتة إلى البكتيريات الحَية السليمة فغَيَّرتْ طبيعَتَها إلى الأبد. كما أدركَ أنه لو تمكَّن من تحديد الجزء المسؤول من البكتيريات الميتة عن هذا التغيّر الجِيني الوراثي فقد يتمكَّن من اكتشاف تركيب المُوَرِّثات.

اتضَّح أن ذلك كان مادةً تسمى الحمض النووي الناقص الأوكسجين الذي ربما ستَعرِفُهُ باسمه المختَصَر المَشهور DNA وأنه هو الذي يتمتَّع بصِفة النَّقل الوراثي. عَرفَ العلماءُ آنذاك أن الصّبغيات التي تَحمِل المُوَرِّثات داخل الخلايا تحتوي على الحمض الوراثي DNA، ولكن معظم علماء الأحياء اعتَقَدوا أن هذا الحمض هو مادةٌ أبسَط من أن تكون مسؤولةً عن ظاهرةٍ معقّدة مثل الوراثة. غير أنهم كانوا مخطِئين.

يَضُمُّ كل صبغيٍّ من صِبغياتِكَ في داخلِه جُزيئًا واحِدًا غير متَقَطِّع من الحمض النووي DNA. قد يكون هذا الجُزيء طويلًا جدًا ويتألف من مئات وربما آلاف من المُوَرِّثات المرتَّبة في سلسلة واحدة تلو الأخرى. فمثلًا، يحتوي صبغيّ الإنسان رقم 2 على شريطٍ فيه 1300 مُوَرِّثَة مختلفة، وإذا مُدِّدَتْ تلك القطعة من جُزيء الحمض النووي DNA فقد يَصِلُ طولها إلى أكثر من ثمانية سنتيمترات. وبحسابٍ بسيط نَصِلُ إلى احصاءٍ غير عادي هو أن الصّبغيات السّت وأربعين في كل خلية ضئيلة من خلايا جسمكَ تَضمُّ أكثر من مِترَين من الحمض النووي DNA. وبطريقة مُعجِزَة في التَّعبئة تتَوضَّع كلها في خليةٍ لا يزيد قياس قِطرُها عن بضعة أجزاء من الألف من الميليمتر. والأكثر من ذلك هو أنك إذا تَمَكَّنتَ من وَصلِها مَعًا ونَشرِ جميع طيّات والتواءات الحمض النووي DNA الموجود في تريليونات خلايا جسمكَ في خيطٍ واحد رفيع فربما سيصِلُ طوله إلى حوالي 20 بليون كيلومتر، وهذا يكفي لكي يَصِلَ هذا الخيط بين الأرض والشمس 65 مرة!

كان آفري رجلًا متواضعًا جِدًا ولم يَصنَع كثيرًا من الضَّجة حول اكتشافِه، بينما انتَقَد بعض علماء الأحياء استِنتاجاتِه. إلا أنه كان مُحقًّا بأن المُوَرِّثات تتألف من الحمض النووي DNA. ما أن رَسختْ هذه الحقيقة العلمية حتى أشارَتْ إلى ولادة عَصر جديد في عِلم الوراثة والأحياء. أمكَنَ فَهمُ

المُوَرِّثات أخيرًا كمواد كيميائية، مجموعةٌ مستقرة من الذَّرات التي خَضَعَتْ لقوانين الفيزياء والكيمياء.

إلا أن ما أَطلَقَ فعلًا هذه الحقبة الجديدة الشجاعة هو اكتشاف التركيب الكيميائي للحمض النووي DNA. تَعتَمد معظم الاكتشافات المهمّة في عِلم الأحياء على أبحاث كثيرٍ من العلماء الذين كَشَفوا ببطءٍ على مَدى سنين وعقود طبيعةَ الواقع لكي يُظهِروا تدريجيًا حقيقةً مهمَّة. ولكن تَظهَر أحيانًا رؤيةٌ باهرة بشكلٍ سريع، وذلك ما حَدَثَ مع اكتشاف بُنيَة الحمض النووي DNA. ففي خلال بضعة أشهر تمكَّنَ ثلاثةُ علماء يَعملون في لندن هم روزاليند فرانكلين Rosalind Franklin وريموند غوسلينغRaymond Gosling وموريس ويلكينز Maurice Wilkinsمن إجراء تجارب حاسمة، ثم فَسَّرَ فرانسيس كريك Francis Crickوجيمس واطسونJames Watson في جامعة كامبريدج نتائج التجارب ونَجَحوا في استِنتاج تركيب جُزيء الحمض النووي DNA. كما أنَّهما سرعان ما أدرَكا ما يَعنيه لفَهم سِرِّ الحياة.

تعرفتُ عليهما جيدًا بعد أن تقدَّما في السّن. كانا متناقِضَين، فقد كان لفرانسيس كريك ذِهنٌ منطقي حادّ يستطيع أن يُحلل المسائل حتى تَذوب تحت نَظرَتِه، بينما كان لجيمس واطسون حَدسٌ مُرهَف يَقفز به إلى استنتاجات لا يَراها غيره ولم تكن طريقة وصوله إليها واضحة دائمًا. كان كلٌّ منهما واثِقٌ من نفسه وجَريء في التعبير عن رأيه، ويَستطيع التفاعل جيدًا مع العلماء الصغار ولو كان ناقِدًا في بعض الأحيان. وشكَّلا معًا فريقًا رائعًا.



واطسن وكريك في

جامعة كامبردج 1952

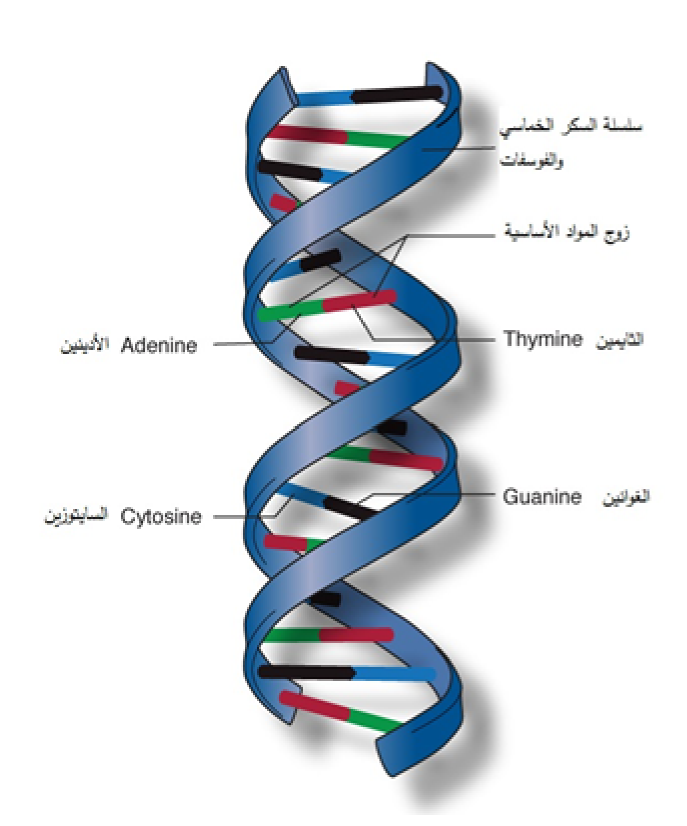
أجملُ ما في نموذج اللولب الثنائي لجُزيء الحمض النووي DNA الذي قدَّماه ليس فقط أناقة هيكَلِهِ المُلتَفّ برشاقة، بل كذلك في الطريقة التي يُفَسِّرُ بها تركيبُه المُفتاحَين الرئيسيَين اللذَين يجب على المادة الوراثية أن تقوم بهما لتَدعَم استمرار ودَيمومة الحياة. أولًا يجب على الحمض النووي DNA أن يَحتَفظ برموز المعلومات التي تحتاج إليها الخلايا والكائنات الحَية لكي تنمو وتحافِظ على نفسِها وتتكاثر. وثانيًا يجب أن يتمكَّن من مضاعَفة نفسِه بدقّة وبشكلٍ موثوق بحيث أن كل خلية جديدة وكل كائنٍ حَيٍّ جديد يستطيع أن يرِثَ مجموعةً كاملة من المعلومات الوراثية.

يمكنك أن تتصور هيكلَ الحمض النووي DNA مثل سُلَّمٍ مُلتَفٍ على نفسِه بشكل لَولَبيّ يمكِنُهُ تفسير طريقةِ القيام بهاتَين الوظيفَتَين. لنَنظُر كيف يَحمل جُزيء الحمض النووي DNA المعلومات. تتألفُ كل دَرَجَةٍ من درجات السلّم من روابط تتشكّل بين أزواج من مُرَكَّبات كيميائية تسمى قواعد النيوكليوتيدات Nucleotide Bases تأتي هذه القواعد بأربعة أشكال مختلفة فقط هي: الأدنين (A) Adenine، والثيامين (T) Thymine، والغوانين (G) Guanine، والسيتوزين (C) Cytosine. تَرتيبُ هذه القواعد الأربَع على طول السلّم يَعمَلُ كَرموزٍ للمعلومات، وذلك مثلما تَنقُلُ رسالةٌ ترتيبَ سلسلة الحروف التي تتألفُ منها هذه الجملة التي تَقرؤها. تتألفُ كل مُوَرِّثَة من سلسلةٍ محدَّدَة الطول في جُزيء الحمض النووي DNA تَرمُزُ إلى سلسلةٍ من الأوامر للخلية. قد تكون تلك الرسالة أوامر بانتاج صباغ يُحدِّدُ لونَ العَين، أو يَجعل خلايا زهرة بازلاء بنفسجية، أو يَجعل بكتيريات التهاب الرئة أكثر إمراضية... تحصل الخلايا على الرسائل من الحمض النووي DNA عن طريق "قراءة" هذا الرَّمز الوراثي وتَنفيذ تلك المعلومات.

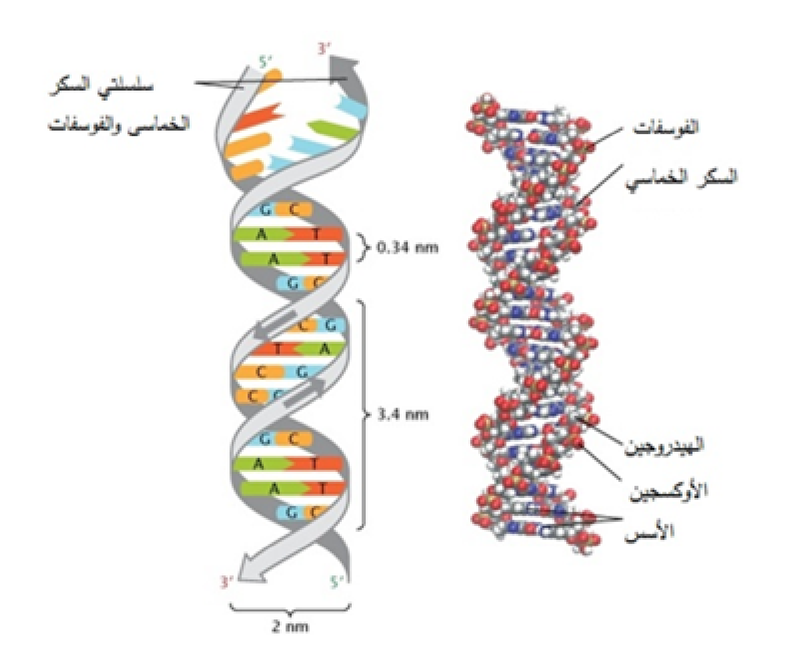
ثم هناك ضرورةٌ لصُنع نسخٍ صحيحة من الحمض النووي DNA بحيث يمكن لجميع المعلومات في المُوَرِّثات أن تَنقُلَ بدقّة وأمانَة من جيل من الخلايا أو الكائن الحَيّ إلى الجيل التالي. يَضمَن الشكل والصفات الكيميائية للقاعدتَين اللتَين تُشكّلان كلّ دَرَجة من دَرَجات السلّم التقاءَ كل قاعدتَين بطريقةٍ واحدة دقيقة، إذ أنَّ القاعدةA لا يمكن أن تلتقي إلا مع القاعدة T، والقاعدة G لا يمكن أن تلتقي إلا بالقاعدة C. وهذا يعني أنكَ إذا عرفتَ ترتيب القواعد على طول شريطٍ من الحمض النووي DNA ستَعرف فورًا ترتيب قواعد النيوكليوتيدات على الشريط المُقابِل، وهذا يعني أنكَ إذا فَصَلتَ بين شريطَي اللولب الثنائي فكلُّ شريطٍ يمكن أن يَعمل كقالَب لإعادة صُنع نسخةٍ دقيقة مماثِلة من الشريط الأصلي المُقابِل له. ما أن اكتَشَفَ كريك وواطسون بُنيَةَ الحمض النووي DNA

حتى أدرَكا أن هذه يجب أن تكون طريقة نَسخِ الخلايا للحمض النووي DNA الذي يكوّن صِبغياتِها ومُوَرِّثاتِها.

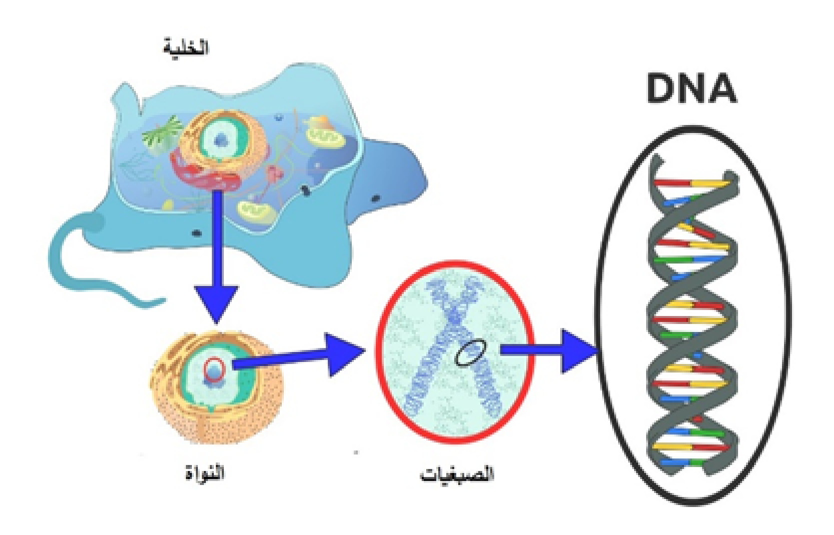
تُمارِسُ المُوَرِّثاتُ تأثيرها الكبير على عمل الخلايا وبالتالي على الكائنات الحية عن طريق توجيه الخليةِ لصُنعِ بروتيناتٍ معيَّنة. هذه المعلوماتُ جوهريةً في الحياة لأن البروتينات هي الأشياءُ التي تقوم بمعظم الوظائف في الخلية، وذلك لأن معظم إنزيمات الخلية وهيكَلها وأنظمَة عملها مَصنوعَة من بروتينات. لكي تَقومُ الخلايا بصُنع البروتينات عليها أن تقومَ بعملية تَرجَمة بين أبجديتَين: أبجَدية الحمض النووي DNA التي تتألف من أربعة "حروف" (A، T، G، C)، وأبجَدية البروتينات الأكثر تعقيدًا والتي تتألف من 20 وحدة بِناء مختلفة هي الحموض الأمينية. أمكَن فَهمُ هذه العلاقة الأساسية بين المُوَرِّثات والبروتينات في أوائل الستينيات، ولكن لم يَعرِف أحدٌ كيف تُترجِمُ الخليةُ المعلومات من لُغَةِ الحمض النووي DNA إلى لُغَةِ البروتينات.



رسم توضيحي لتركيب الحمض النووي DNA بشكل لولب ثنائي منتظم



رسم توضيحي لتركيب الحمض النووي DNA بشكل لولب ثنائي منتظم يوضح الأزواج المتقابلة فيه

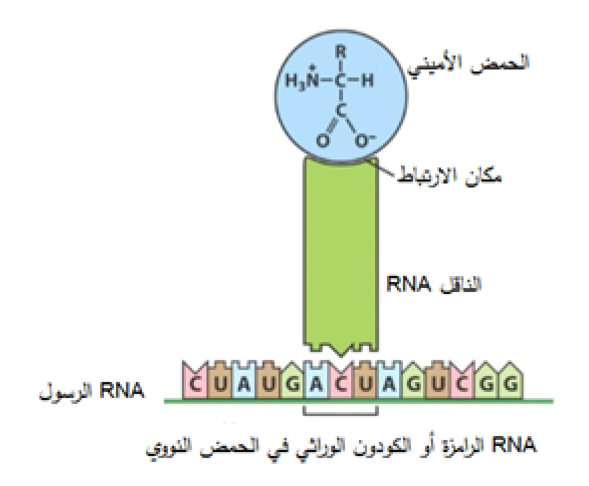


رسم يوضح تفاصيل بُنية الصّبغيات والحمض النووي DNA في نواة الخليّة

تُعرَفُ هذه العلاقة في الترجَمة باسم "الشّيفرَة الوراثية Genetic Code"، وقد قدَّمَتْ لعلماء الأحياء أُحجِيَةً مُشَفَّرَةً حقيقية. أمكَن حَلُّ اللغز أخيرًا في أواخر الستينيات وبداية السبعينيات بجهودِ سلسلةٍ من الباحِثين. عَرفتُ منهم بشكلٍ جيد فرانسيس كريك وسيدني برينر Sydney Brenner.

كان سيدني أظرَفُ مَن عرفتُ من العلماء وأقلّهم توقيرًا. أجرَى مقابَلة معي ذات مرة من أجل عَمل (لم أحصَل عليه) ووَصَف خلالها زملاءَه بمقارَنتِهم مع الشخصيات المَجنونة في لوحة بيكاسو الشهيرة *Guernica* التي كانت معلَّقة على جِدار مَكتبِه. ارتَكَزَ مزاحُهُ على استِحضارِ غير المتوقَّع، وأعتَقِدُ بأن ذلك كان مَصدَر ابداعِهِ الواسع كعالِم.

أظهَرَ هؤلاء وغيرهم ممن فَكَّكوا ألغازَ الشيفرة الوراثية أن أبجَدية الحروف الأربعة للحمض النووي DNA مُرتَّبة وِفقَ "كلماتٍ" ثلاثية الأحرف على كل شريطٍ من شريطَي سلّم الحمض النووي DNA. وكل كلمة من هذه الكلمات الثلاثية الأحرف تتوافَقُ مع حمض أميني مُحدَّد في بِناء البروتينات. فمثلًا، "الكلمة" GCT تأمُرُ الخليةَ بإضافة الحمض الأميني "ألانين" إلى البروتين الجديد الذي يتم صُنعه، بينما TGT تأمُرها بإضافة الحمض الأميني "سيستئين". يمكنك تَصوّر المُوَرّثَة بسلسلةٍ من كلمات الحمض النووي DNA اللازمة لصُنع بروتينٍ مُعيَّن. فمثلًا، المُوَرّثَة البشرية التي تسمى بيتا-غلوبين تحتوي على المعلومات الأساسية اللازمة في 441 حرف من حروف الحمض النووي DNA (441 قاعدة نيوكليوتيدية) تتضَمَّن تَهجِئة 147 "كلمةٍ" ثلاثية من كلمات الحمض النووي DNA التي تُتَرجِمُها الخلية لِصُنعِ جُزيءٍ بروتيني يتألف من 147 حمضٍ أميني. في هذه الحالة، يُساعد البروتين بيتا-غلوبين في صُنع الصِّباغِ النّاقِل للأوكسجين الذي يُسمى الهيموغلوبين (خُضاب الدم) الموجود في خلايا الدم الحمراء والتي تحافِظ على حياة جسمكَ وتَجعل دَمكَ أحمرَ اللون.



شكل توضيحي لفكرة الناقل الذي يصل بين الحمض الأميني والمعلومات الوراثية في صنع البروتينات الشِّيفرَة الوراثية (الرامزة أو الكودون)

حَلَّت القدرةُ على فَهمِ الشِّيفرَة الوراثية معضلَةً كبرى في قَلبِ عِلم الأحياء، فقد أظهَرتْ كيف أن الأوامر الثابتة المَخزونة في المُوَرِّثات يمكن أن تُصبِحَ جُزيئاتٍ بروتينية نشيطة في بِناء وتَشغيل الخلايا. فَتَحَ حَلُّ هذه الشِّيفرَة الطريقَ إلى عالَم اليوم حيث يستطيع علماء الأحياء فورًا وَصفَ وتَفسيرَ وتَغيير تسلسل المُوَرِّثات. ظَهَرَ هذا التقدم في وَقتِه على دَرَجة عظيمة من الأهمية حتى أن بعض علماء الأحياء تَركوا أدواتهم ظَنًّا منهم أنّ أهمّ مسائل بيولوجيا الخلية والوراثة قد تم حَلُّها. حتى فرانسيس كريك قَرَّر تغيير تركيزِه من الخلايا والمُوَرِّثات إلى حَلِّ المسائل الغامضة عن الوعي الإنساني.

والآن بعد مضيّ أكثر من خمسين سنة يبدو واضحًا أن الأمور لم تَنتَهِ تمامًا، ومع ذلك فقد تمكَّنَ علماءُ الأحياء من تحقيق تقدّم مهمّ. خلال قَرن واحد، بَدأت فيه المُوَرِّثات بفكرة عناصر مُجَرَّدَة وتَحوَّلَتْ جَذريًا، وعندما أنهيتُ دراسَتي لشهادة الدكتوراة سنة 1973 لم تَعد المُوَرِّثات مجرد فكرة أو جُزء من الصّبغيات، بل أصبَحتْ سلسلةً من قواعد النيوكليوتيدات على شريطِ الحمض النووي DNA تَحمِلُ في تركيبها رموزًا لصُنع بروتينات ذات وظائف محدَّدة في الخلية.

سرعان ما عَرفَ علماءُ الأحياء كيف يُحدّدون مَوقِع مُوَرِّثاتٍ معيَّنة في الصّبغيات، وكيف يَفصِلونها ويَنقِلونها بين الصّبغيات، وحتى يزرعونها في صِبغياتِ أنواعٍ حَيَّةٍ مختلفة. في أواخر السبعينيات مثلًا، أصبَحتْ صبغيات البكتيريات القولونية *E. coli* بعد إخضاعها لتقنيات الهندسة الوراثية تَضمُّ المُوَرِّثَة البَشَرية التي توجِّهُ صُنعَ بروتينِ الإنسولين الذي يُنظِّمُ السّكر في الدم. تُنتِجُ هذه البكتيريات المُهندَسَة كميات اقتصادية كبيرة من الإنسولين الذي يُماثِلُ تمامًا الإنسولين الذي تَصنَعُهُ غدّة البنكرياس في الإنسان، وقد ساعَدَتْ منذ ذلك الحين في علاج السكري لدى ملايين البشر في كافة أرجاء العالَم.

توصَّلَ عالِم الكيمياء الحيوية البريطاني فرِد سانغر Fred Sanger إلى اختراعٍ حاسم آخر عندما صمَّم طريقةً "لقراءة" المعلومات الوراثية. استَخدَم تركيبةً عبقرية من التفاعلات الكيميائية والطرق الفيزيائية لتمييز طبيعةِ وتَسلسل جميع القواعد النيوكليوتيدية التي تؤلِّف مُوَرِّثَة (تسمى هذه الطريقة: كَشفَ تَسَلسُل الحمض النووي DNA). يُغطّي عددُ أحرف (قواعد) الحمض النووي DNA في المُوَرِّثات المختلفة مَجالًا واسعًا جدًا، من مئتَي قاعدة إلى عدة آلاف، وكانت إمكانية قراءتها وتوقّع

البروتين الذي توجّه صُنعَهُ خطوةً كبيرة إلى الأمام. كان فريد متواضِعًا بشكل غير عادي، كما كان ناجِحًا كذلك، وحَصَل على جائزة نوبل مرَّتَين!

مع نهاية القَرن العشرين، أمكَن تحديد تسلسل جميع المُوَرِّثات أو كلّ المادة الوراثية الموجودة في خلية أو في كائن حَيّ، حتى عند الإنسان. تم تحديد تَسلسُلِ الثلاثة بلايين "حرفٍ" في الحمض النووي DNA للمادة الوراثية عند الإنسان لأول مرة بشكل تام تقريبًا سنة 2003. كانت خطوةً كبيرة في عِلم الأحياء وفي الطب، ولم يتوقف التقدم منذ ذلك الحين. وبينما استَغرقَ كَشف تَسلسل تلك المادة الوراثية الأولى عَشر سنوات، وكلَّف أكثر من بليوني جنيه استرليني، فإن كَشف تسلسل الحمض النووي DNA بتقنيات هذه الأيام يمكن تحقيقه في يوم أو يومين وبكلفة مئات قليلة من الجنيهات.

كانت أهمّ نتائج مشروع كَشف تَسلسل المادة الوراثية عند الإنسان هي تحديد لائحةٍ من حوالي 22000 مُوَرِّثَة مشترَكة بين جميع البَشَر تشكّل القاعدة الأساسية للوراثة عند الإنسان. وهي تحدِّد السِّمات التي نَشتركُ بها جميعًا والصفات المَوروثة المميّزة التي تجعلنا أفرادًا مختلفين. لا تكفي هذه المعرفة وحدَها لتَفسير ما الذي يَعنيه أن يكون المَرء إنسانًا، ولكن بدونها سيكون فَهمُنا ناقِصًا. إنه أمرٌ يشبه حصولنا على لائحة الشخصيات في مسرحية، وهي نقطةُ انطلاقٍ ضرورية بكل تأكيد، ولكن المهمّة التالية الأكبر هي كتابةُ المسرحية وإيجاد الممثلين الذين يستطيعون بَثَّ الحياة في هذه الشخصيات.

انقسامُ الخلية له دَورٌ حيوي في الرَّبط بين مفاهيم "الخلية" و"المُوَرِّثَة". ففي كل مرة تَنقسِم فيها خلية يجب أولًا أن تُنسَخ جميع المُوَرِّثات على جميع الصّبغيات الموجودة داخل الخلية، ثم تَنقسِم بالتساوي بين الخليتَين الجديدتَين. ولذا يجب أن تَتناسَق بدقّة عملية نسخ المُوَرِّثات مع انقسام الخلية. وإذا لم يَحدُث التَّنسيق الدقيق فقد نَحصل على خلايا قد تموت أو تكون مشوَّهة لأنها تَفتَقِد إلى المجموعة الكاملة من المعلومات الوراثية التي تحتاجها. يتحقَّق هذا التنسيق الدقيق في "دَورة الخلية"، وهي العملية التي تُنَسِّق ولادةَ كلِّ خليةٍ جديدة.

يتم نَسخُ الحمض النووي DNA مبكرًا في دَورة الخلية في مَرحلةٍ من صُنعِ الحمض النووي تُسمّى ذات الشكل المُلتَوي S-phase، ثم يَحدث انفصال الصّبغيات التي تم نَسخُها في مرحَلة تُسمى الانقسام المتساوي Mitosis. تَضمَنُ هذه العملية أن يكون في كل من الخليتَين اللتَين

تُنتَجان عن انقسام الخلية الأم مجموعةٌ كاملة من المُوَرِّثات. توضح هذه المراحل في دَورة الخلية جانبًا مهمًّا من الحياة: إنها تَرتَكِزُ على تفاعلات كيميائية ولو أنها تفاعلات معقّدة جدًا. لا تُعتَبر هذه التفاعلات حَيّةً في حَدِّ ذاتها، إذ يبدأ ذلك فقط عندما تعمل جميع المئات من التفاعلات الضرورية لِخَلقِ خليةٍ جديدة بالعمل معًا لتشكّل نظامًا كاملًا يقوم بأداءِ هدفٍ معيَّن. هذا هو ما تفعله دَورة الخلية للخلية: إنها تَبعثُ الحياةَ في كيمياءِ تَضَاعُفِ الحمض النووي DNA، وعندما تَفعلُ ذلك فإنها تكمل تحقيق هدف التكاثر في الخلية.

توصّلتُ إلى إدراك الأهمية الأساسية لدَورة الخلية في فَهم الحياة في أوائل العشرينيات من عمري عندما كنتُ طالبًا في جامعة University of East Anglia in Norwich أبحثُ عن موضوع دراسةٍ لمتابعة مِهنتي العلمية. لم أعتَقد حينها أن البحث العلمي الذي بدأتُه في السبعينيات سيُصبح شَغَفي البَحثِيّ طول حياتي.

مثل بقية العمليات الأخرى في حياة الخلايا فإن دَورة الخلية تُسَيِّرها المُوَرِّثات والبروتينات التي تُنتِجُها المُوَرِّثات. وعلى مَرّ السنين، كان طموحي المِخبري يوجِّهِهُ البحثُ عن المُوَرِّثات المعيَّنة التي تُدير دَورة الخلية، ثم اكتشافُ كيف تفعل ذلك. ولكي نحقّق ذلك استَخدَمنا خَميرةً انشِطاريةً (نوعٌ من الخَميرة التي تُستَخدَم لصُنع البيرة في شرق أفريقيا) لأنها بسيطة نسبيًا ولكن دَورة الخلية فيها تشبه كثيرًا دَورات الخلايا الموجودَة في كثير من الكائنات الحَيّة الأخرى، بما فيها كائنات حَية كثيرة الخلايا أكبر بكثير مثلنا. انطَلَقنا للبحثِ عن سلالاتٍ من الخَميرة التي تحتوي على طَفرات في مُوَرِّثاتِها تتعلق بتنظيم دَورة الخلية.

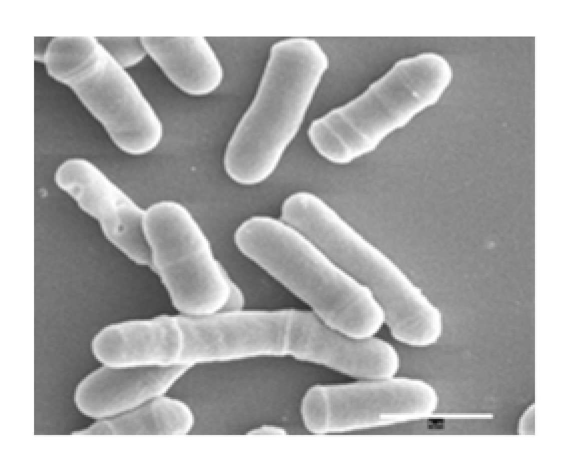
يُستخدِم علماءُ الوراثة اصطلاحَ "طَفرة *Mutant*" بطريقةٍ خاصة، فليس من الضروري أن تكون المُوَرِّثَة المصابَةُ بطَفرةٍ شاذَّةٌ أو مُحطَّمَةٌ، بل تعني ببساطة أنَّ فيها مُوَرِّثَة مُتغَيِّرَة. سلالاتُ النباتات المختلفة التي دَرَسَها مندل، مثل تلك التي لها أزهارٌ بنفسجية أو بيضاء، تَختلِفُ عن بعضها بعضًا بسبب حدوث طَفرات في مُوَرِّثَةٍ ضرورية لتحديد لَون الزهرة. بالمنطق نفسه فإن البَشَر الذين لديهم عيونٌ ذات ألوان مختلفة يمكن اعتبار أنهم سلالاتٌ بَشَرية تحمل طَفرات مميّزة. وغالبًا لا مَعنى للقول أي من هذه التَّنويعات المختلفة يمكن اعتباره "طبيعيًا".

تَحدُثُ الطَفرات عندما يتغيّر تسلسل الحمض النووي DNA في مُوَرِّثَة، أو يُعادُ ترتيبُهُ، أو يَحدُثُ ذلك عادةً إما نتيجة ضَررٍ في الخلية إثرَ تَعرُّضِها للإشعاع أو لمواد كيميائية مثلًا، أو نتيجةَ

أخطاءٍ تَحدُثُ أحيانًا أثناء تَضاعُف الحمض النووي DNA وانقسِام الخلية. توجَدُ في الخلية آليات متقدّمة لكَشف وإصلاح معظم هذه الأخطاء، مما يعني أن الطَّفرات نادرة، ويُعتَقد أن حوالي ثلاث طَفرات صغيرة تَحدُثُ في كل انقسام لإحدى خلايا جسمكَ. وهذا معدلٌ ضئيل جدًا يقترب من تغيّر "حَرفٍ" واحد من كل بليون حَرف من الحمض النووي DNA. ولكن عندما تَحدُثُ الطَّفرات قد تُحدِثُ أشكالًا مختلفة من المُوَرِّثات التي تُوجِّهُ صُنعَ بروتيناتٍ مختلفة تؤدي بدَورها إلى تغيّر في التفاعلات الحيوية في الخلايا التي تَحمِلُها.

تَمنَحُ بعضُ الطَّفرات فرصةً للاكتشاف عندما تُغيّرُ طريقةَ عمل مُوَرِّثَةٍ بطريقة مفيدة، ولكن الطَّفرات في كثير من الأحيان تَمنَع مُوَرِّثَةً من أداء عملها بشكلٍ صحيح. وإن تغيّر حرف واحد في الحمض النووي DNA يؤدي أحيانًا إلى تغيّر كبير. فمثلًا، عندما يَرِثُ مولودٌ نسختَين من طَفرة معيَّنة لمُوَرِّثَة بيتا-غلوبين فيها تغيّرٌ في قاعدةٍ واحدةٍ في الحمض النووي DNA، فإن خضاب الدم الذي تُوَجِّهُ صُنعَهُ لا يكون فَعالًا تمامًا ويَحدُثُ لدى المولود مرضٌ في الدم يسمى فَقرُ الدم المِنجَلي Sickle Cell Disease.

لكي أدرُس كيف تتحكم الخَميرة الانشطارية في دَورة الخلية، بَحثتُ عن سلالةٍ من الخَميرة لا تتمكَّن من الانقسام بشكلٍ صحيح. أدركتُ أننا إذا تمكَّنا من معرفة هذه الطَّفرات، سنتمكَّن من تحديد المُوَرِّثات الضرورية لدَورة الخلية. بدأتُ مع زملائي في المختبر بالبَحثِ عن طَفراتٍ في الخَميرة الانشطارية لا تستطيع القيام بانقسام الخلية ولكنها تستطيع النمو. كان اكتشافُ هذه الخلايا سَهلًا جدًا تحت المجهر لأنها استمَرتْ في النمو دون أن تنقسم فأصبَحتْ كبيرةً بشكلٍ واضح غير طبيعي. وعلى مَرِّ السنين، أربعين سنة في الواقع، تمكَّنَ المختبرُ من اكتشاف أكثر من 500 من سلالاتِ الخَميرة الانشطارية الكبيرة اتضَحَ بالفعل أنها كلها تحتوي على طَفراتٍ عَطَّلَتْ عمل مُوَرِّثات ضرورية في مراحل معيّنة في دَورة الخلية. وهذا يعني وجود 500 مُوَرِّثَة على الأقل مشارِكة في دَورة الخلية، أي حوالي 10% من المجموعة الكاملة من 5000 مُوَرِّثَة موجودة في الخَميرة الانشطارية.



خلايا الخميرة تحت المجهر

كان ذلك تقدّمًا جيدًا لأن تلك المُوَرِّثات كانت ضرورية لكي تَستَكمِلَ خليةُ الخَميرة دَورتها، ولكن ذلك لا يعني بالضرورة أنها تتحكّم بدَورة الخلية. فمثلًا، لو فكّرتَ بالطريقة التي تعمل بها السيارة، هناك أجزاءٌ كثيرة إذا تعطّلَتْ يمكن أن تُوقِفَ السيارة مثل الدواليب والمِحوَر والهيكل والمحرِّك، ومن المؤكَّد أن كل هذه الأجزاء مهمّة ولكن أيًا منها لا يَستخدِمها السائق للتحكُّم بسرعة السيارة. بالعودة إلى دَورة الخلية، ما أرَدنا أن نَجِدَهُ فعلًا هو دواسَة البنزين، وعلبة السرعات والمَكابح، أي المُوَرِّثات التي تتحكّم بسرعة الانقسام في دَورة الخلية.

وقعتُ صدفةً على أولى المُوَرِّثات التي تتحكّم بدَورة الخلية. أذكُرُ تلك اللحظة جيدًا سنة 1974 عندما كنت أستَخدِم مجهرًا في البَحثِ المتعِب عن طَفرات خلايا كبيرة من الخَميرة الانشطارية، وكان ذلك عمل روتيني طويل لأن واحدةً فقط من كل عشرة آلاف مَزرَعَة فحَصتُها كانت تثير الاهتمام فعلًا. استغرقَ الأمرُ صباح ومساء يوم طويل لإيجاد كلّ واحدة من تلك الطَّفرات، ولم أجِد أيًا منها في بعض الأيام. ثم لاحَظتُ مزرعةً تضمُّ خلايا كانت صغيرةً بشكلٍ غير عادي. ظننتُ لأول وَهلة أنها بكتيريات لَوَّثَتْ طَبَقَ بتري، وهو أمرٌ مزعجٌ كثير الحدوث. ولكن بعد فحصٍ دقيق لاحظتُ أنها ربما تكون شيئًا أكثر أهمية. ربما كانت طَفرات في الخَميرة تَسارَعتْ فيها دَورة الخلية قَبل أن يُتاحَ لها الوقتُ للنمو فانقسَمتْ بأحجام أصغَر؟

اتضَحَ أن هذا المنطق في التفكير كان صائبًا، وكانت الطفرة في هذه الخلايا تغيّرًا في مُوَرِّثَة تتحكَّم في سرعة انقسامها المتساوي واستكمال دَورة خلاياها. كانت هذه بالضبط هي المُوَرِّثَة التي

كنت آملُ باكتشافها. كانت تلك الخلايا مثل سياراتٍ ذات دواسَة بنزين معطَّلة تَجعلُ السيارةَ تسير مُسرِعة، وفي هذه الحالة تَجعل دَورة الخلية تتسارع أكثر. أطلقتُ على هذه الخَميرة الصغيرة اسم: الطَّفرَة "وي wee"، لأنها عُزِلتْ في مدينة إدنبرة، وكلمة wee باللغة الاسكتلندية تعني صغيرة. لا بد من أن أعترفَ أن الفكاهةَ تتلاشى بعد نصف قَرن.

اتضَحَ أن المُوَرِّثَة التي تغيّرتْ في تلك الطَّفرة الأولى "وي" تعملُ مع مُوَرِّثَة أكثر أهمية في التحكم بدَورة الخلية. ومثلما يَحدثُ عادةً فإن حادثةً سعيدة أخرى قادَتْني لاكتشاف مُوَرِّثَةِ تَحكُّمٍ أخرى مُراوِغة. كنتُ أعمل شهورًا عديدة في عَزل سلالات مختلفة من طَفرات "وي" الصغيرة الخلايا، وجمعتُ بصعوبة حوالي خمسين منها. وكانت مهمةً أصعبُ من البحث عن طَفرات كبيرة الخلايا، واقتضَى الأمرُ حوالي أسبوع تقريبًا لاكتشاف كل واحدة من هذه السلالات. زادَ في صعوبة هذا التحدي أن معظم السلالات التي عَمِلتُ جاهِدًا في تمييزها لم تكن مهمّةً لأنها كانت تحتوي على طَفرات مختلفة قليلًا من المُوَرِّثَة ذاتِها أطلقتُ عليها اسم "وي-1 *wee-1*".

وفي عصر يوم جمعة ممطر وجدتُ طَفرة "وي" أخرى، وفي هذه المرة كان طَبَقُ بتري ملوَّثًا بشكلٍ مؤكَّد: كان الطَّبقُ وخلايا الخَميرة الصغيرة التي لفَتتْ نظري مغطاةً بخيوطٍ طويلة من غزوِ فِطرٍ. كنتُ متعَبًا وعرفتُ أن التخلص من الفِطر المُعتدي سيكون مهمّةً طويلة ودقيقة. وعلى كل حال فقد افترضتُ أن هذه السلالة الجديدة غالبًا ستحتوي على طَفرة أخرى من المُوَرِّثَة "وي-1"، ورميتُ طَبَقَ بتري بكامله في سلَّة المُهملات وذهبتُ إلى البيت لتناول الشاي.

شعرتُ ببعض الذَّنْب في المساء بسبب ما فعلتُه، فماذا لو كانت هذه الطَّفرةُ مختلفةً عن الخمسين التي سبَقَتْها؟ كان الليل قد حَلَّ، والمطرُ يهطلُ في ليلِ إدنبرة ولكنني تحاملتُ على نفسي وركبتُ دراجتي عائدًا إلى المختبر في أعلى التلة. تمكنتُ بعد أسابيع قليلة من عَزل الطَّفرة الجديدة عن الفِطر المُعتدي، ولِعَظيم سروري اتضَحَ أنها لم تكن طَفرة "وي" أخرى، بل طَفرةَ مُوَرِّثَةٍ جديدةٍ تمامًا، واتضَحَ في النهاية أنها كانت مفتاحًا لمعرفة كيفية التحكّم بدَورة الخلية.

أطلقتُ على طَفرتي الجديدة اسم "الدَّورة 2" أو اختصارًا "cdc2". أتمنّى الآن لو أنني أطلقتُ اسمًا أكثر أناقة على هذا الجزء المَركزي من أُحجِية دَورة الخلية، أو على الأقل اسمًا يسهل تذكُّره! وعلى كل حال ستَسمَع أكثر عن الطَّفرة cdc2 في هذا الكتاب.

مع الاستفادة من النظر إلى الوراء، يبدو كل ذلك سهلًا جدًا سواءً في التنفيذ أو في التفكير. وكان الحظ مهمًّا جدًا كذلك في المصادَفة الأولى التي كَشَفَت الطّفرة "وي" التي لم أكن أبحثُ عنها أصلًا، وغرابة القدر التي دفَعتْني إلى استرجاع تجربةٍ "فاشلة" من سلّة المهملات التي قادَتني في النهاية إلى اكتشافِ اللاعب المركزي في التحكّم بدَورة الخلية. قد تكون التجارب السهلة والتفكير البسيطة مُلهِمَةً في العِلم بشكل مدهش خاصة عندما تُضافُ إليها كميةٌ جيدة من العمل الجَادّ والأمل ولحظات من الحَظّ أحيانًا.

قمتُ بمعظم هذه التجارب عندما كنتُ عالِمًا مبتدِئًا ولديَّ أسرة صغيرة في البيت وأعمَلُ في مختبر البروفسور ميردوخ ميتشيسون Murdoch Mitchison في إدنبرة. مَنَحَني المكانَ والأدوات التي احتَجتُ إليها في تجاربي مع جُرعَةٍ لانهائية من النصائح والملاحظات على ما كنتُ أقومُ به. وعلى الرغم من كل مساهماتِه، لم يَسمَح لي بإضافة اسمه كأحَدَ الكتّاب في أيّ من دراساتي المَنشورة لأنه لم يَعتَقد بأنه ساهَمَ فيها بما يكفي. ولم يكن ذلك صحيحًا بالطبع، بل كان كَرَمًا مثل الذي قابَلتُهُ بشكل رئيسي خلال ممارستي للبحث العلمي ولكنه لا يحظَى بالتقدير الذي يَستحِقّ. كان ميردوخ رجلًا مثيرًا للاهتمام، كريمًا كما قلتُ، وخجولًا بعض الشيء ومستغرِقًا كليًا في أبحاثِه. لم يهتمّ كثيرًا بما يظُّنه الآخرون، بل سارَ على إيقاعِه الخاص. لو كان ميردوخ على قيد الحياة فربما لم يكن سيوافِق على وَصفي له بهذا الشّكل هنا، غير أنني أريدُ مَنحَهُ ما يستحقُّ من التقدير والامتنان لأنه علَّمَني أنَّ أفضَلَ بَحثٍ علميّ هو فَرديٌّ مكثَّفٌ وجَماعيٌّ تمامًا في الوقت نفسِه.

لا يمكن أن توجَدَ الحياة دون مُوَرّثات، وكل جيل جديد من الخلايا والكائنات الحية يجب أن يَرِثَ المعلومات الوراثية التي يحتاج إليها لكي ينمو ويعمل ويتكاثر. وهذا يعني أنه لكي تستمر الكائنات الحية في الوجود على المَدى الطويل، يجب أن تتمكّن المُوَرّثات من مضاعَفة نفسها بدقّة وحَذَر. وبهذه الطريقة وحدَها يمكن المحافظة على تسلسل الحمض النووي DNA ثابتًا عَبرَ كثيرٍ من انقسامات الخلايا بحيث تَصمد المُوَرِّثات في "اختبار الزمن". تَنجَحُ الخلايا في تحقيق ذلك بدقّة مثيرة للإعجاب، ونَرى نتائجَ ذلك في كل ما يحيط بنا. تسلسل الحمض النووي DNA للغالبية العظمى من 22000 مُوَرِّثَة تتحكم في خلايا جسمكَ وتتطابَق تمامًا مع جميع المُوَرِّثات في جميع البشر على سَطح الأرض الآن. كما لا يمكن التمييز بينها وبين تلك التي كانت عند أجدادنا الذين قاموا بالصيد وجَمع الثمار والزراعة ورواية القصص حول نار المخيَّم في أعماق ما قَبل التاريخ

منذ عشرات آلاف السنين. جميع الطَّفرات التي تميّز صفاتكَ الوراثية عن صفاتي، وتميّزنا مَعًا عن أسلافِنا فيما قَبل التاريخ لا تشكّل سوى نسبة ضئيلة (أقلّ من 1%) من الشيفرة الوراثية عند الإنسان. يُعتَبر هذا أحدَ أعظم الاكتشافات في عِلم الوراثة خلال القَرن الحادي والعشرين: مادَّتُنا الوراثية بكل ما فيها من ثلاثة بلايين "حرف" من "حروف" الحمض النووي DNA متشابِهةٌ تمامًا في الجِنسَين وفي جميع الأعراق والأديان والطبقات الاجتماعية. هذه حقيقةُ مساواةٍ مهمَّةٍ يجب تَقديرُها في كافة المجتمعات عَبر أرجاء العالَم.

لا يمكنُنا إهمالَ تلك التَّنويعات المتفرقة التي نَحملُها جميعًا في مُوَرِّثاتِنا على الرغم من أنها ضئيلة بشكلٍ عام إلا أن تأثيرها كبير على فرديةِ بيولوجيَّتِنا وتاريخ حياتِنا. أشتَرِكُ في بعض هذه التنويعات مع بناتي وأحفادي، وهي تفسِّرُ بعض جوانب تشابُهِنا كأسرة. بعضُ تنويعات المُوَرِّثات الأخرى فريدةٌ لدى كل واحد منّا وهي جزءٌ مما يجعلنا أفرادًا مختَلفين متميّزين من خلال تأثيرها على مَظهَرنا الجِسماني وصِحتِنا وطَريقتِنا في التفكير بطُرُقٍ خفيَّةٍ أو واضِحة.

الوراثةُ مركزيةٌ في حياتِنا جميعًا، وهي تُشكِّلُ شعورَنا بشخصيتِنا ونَظرتِنا إلى العالَم. اكتشفتُ متأخِرًا في حياتي أمرًا مدهِشًا عن وراثتي الشخصية. نشأتُ في أسرةٍ من الطبَقة العاملة، فقد اشتغلَ والدي في مَصنع وكانت والدتي عامِلة تَنظيف. تركَ إخوتي وأختي المدرسة عندما كانت بلَغوا حوالي الخامسة عشرة من العمر، وهكذا كنتُ الوحيد الذي ظَلَّ في المدرسة، وذهبتُ بعدَها إلى الجامعة. كانت طفولتي سعيدة، وتلقيتُ دَعمًا جيدًا ولو كان تقليديًا. كان والِداي أكبرُ سِنًّا من أهلِ أصدقائي، وكنتُ أمزَحُ أحيانًا بأنني كأنما نشأتُ مع أجدادي.

بعد ذلك بسنوات، قدَّمتُ طَلَبًا للهجرة إلى الولايات المتحدة الأمريكية للبدء بعمل جديد كرئيسٍ لجامعة روكفلر في نيويورك، ولكنني دهشتُ لرَفضِ طَلَبي. قالتْ دائرة الأمن الداخلي أن سببَ ذلك هو أن شهادة ميلادي التي استَخدمتُها طوال حياتي لم يُسجَّل فيها اسم والِداي. تملَّكني الغضب، وطلبتُ نسخةً كاملة من شهادة ميلادي، وجاءت الصَّدمة عندما فتحتُ المغلَّف الذي يحتوي شهادةَ الميلاد الجديدة وظَهر فيها أن والِداي لم يكونا والِداي، بل كانا فِعلًا جَدّي وجِدّتي. وكانت والدتي الحقيقية هي أختي. واتَّضَح أنها حَمَلتْ بي عندما كانت في السابعة عشرة من عمرها، وبما أن الولادة غير الشرعية كانت تُعتَبر عارًا في ذلك الوقت، فقد أُرسِلتُ إلى بيت عمَّتي في نورويتش حيث وِلدتُ. عندما عُدنا إلى لندن، أرادَتْ جَدَّتي حماية سُمعة ابنتِها فادَّعتْ أنها أمّي ورَبَّتْني كذلك.

المفارقة الكبيرة في اكتشاف كلّ ذلك هو أنه على الرغم من أنني عالِم وراثة إلا أنني لم أعرِف وراثتي الخاصة! وفي الواقع، كان كل مَن عَرف الحقيقة قد توفّي، ولستُ أدري حتى الآن من هو والِدي الحقيقي. والمكان الذي يُفتَرَضُ أن يظهَر فيه اسمه على شهادَة ميلادي، كان فارغًا.

يولَدُ كلّ فَردٍ ومعه عددٌ صغير من التنويعات الوراثية الجديدة التي تَحدُثُ عشوائيًا ولا يَشترِكُ بها مع أيّ مِن والِديه. تُفسّرُ هذه الاختلافات الوراثية شيئًا مما يَجعل كلّ كائنٍ حَيٍّ فريدًا، كما أنها تفسرُ عدم ثبات الأنواع الحَيّة، وعدم تغيّرها على فترات طويلة جدًا من الزمن أيضًا، بل إنَّ الحياةَ تُجَرّبُ دائمًا ظُهورَ ابتكاراتٍ وتكَيُّفات جديدة تُغَيّرُ العالَم ويَتَغَيَّرُ مِنْ حَولِها. ولكي يكون هذا ممكِنًا يجب أن يَحدُث توازنٌ بين الحاجَة للمحافَظة على المعلومات وبَقائها ثابتة، مع قدرتِها في الوقت نفسِه على التغيّر، وبشكلٍ جَوهري أحيانًا. ستُبَيّنُ لنا الفكرة التالية كيف يُمكن أن يَحدُثَ ذلك، وكيف أدى ذلك إلى أن أصبَحَت الحياة متنوعة لدرجة مُحَيِّرَة.

هذه الفكرة التالية هي التطور بالانتقاء الطبيعي.

3 ـ التطور بالانتقاء الطبيعي

الصدفة والضرورة

يَعُجُّ العالَم بتَنوع هائل في أشكال الحياة، مثل الفراشة الصفراء التي بدأتُ بها هذا الكتاب وهي من تَباشير الربيع، وإنَّ أجنِحَتِها الرقيقة الصفراء مثالٌ جميل على مجموعة متنوعة مذهِلة من الحيوانات التي نسميها: الحشرات.

أحبُّ الحشرات، خاصة الخنافس التي كانت موضوعَ هوايةٍ لي عندما كنتُ يافعًا. هناك تنوع مدهِش من الخنافس، ويَعتَقد بعضُ العلماء أن هناك أكثر من مليون نوعٍ مميّز منها في العالَم. عندما نشأتُ في انكلترا، أعجبتُ بنوعٍ من الخنافس الأرضية المدرَّعة التي تتَجول تحت الأحجار، والخنافس التي تُشِعُّ في الليل، والخنافس المنقَّطَة الحمراء والسوداء التي تأكل حشرات المَّن الصغيرة في الحديقة، والخنافس المائية القوية التي تَسبَح في البُرَك، وحشرات السُّوس في أكياس الطحين. تُقدِّمُ لنا الخنافس تنوعًا غريبًا متَنافِرًا، وهي عالَمٌ صغير من تنوع الحياة.

تبدو الحياة بأشكالها المختلفة غامِرةً ساحِقة أحيانًا، فنحن نَشتركُ في عالَمنا مع عدد كبير جدًا من الحيوانات والطيور والأسماك والحشرات والنباتات والفطور ولائِحَةٌ أطولُ من الجراثيم المختلفة، يبدو كل منها متأقلِمٌ جيدًا مع نمَطِ حياتِه الخاص وظروفِ بيئَتِه. وليس غريبًا أن معظم الناس على مَرِّ آلاف السنين اعتَقَدوا أنّ كل هذا التنوع قد نشَأ بجُهدِ خالِقٍ مقدَّس.

تَظهَر فكرةُ الخَلق في معظم الثقافات، مثل فكرة الخَلق اليهودية-المسيحية التي تؤمِنُ بأن الحياة خُلِقَتْ خلال أيام قليلة إذا فُهِمَ النَّصُّ المقدَّس حَرفِيًّا. انتشارُ فكرةِ أنَّ كل نوع حَيٍّ قد تم خَلقُهُ بِيَدِ خالِقٍ مقدَّس دَفَعَ عالِمَ الوراثة هالدين J. B. S. Haldane في القَرن العشرين للبحث في التنوع

الهائل للخنافس، وطَرَحَ رأيًا ساخِرًا بقوله: "مهما يكن الإله الخالِق، فلا بد من أنَّ لديه وَلَعٌ مُفرِطٌ بالخنافس".

بَدأ المفكرون في القَرن الثامن عشر والقَرن التاسع عشر بمقارَنة العمليات الدقيقة في الكائنات الحية مع الآلات المعقَّدة التي صُمِّمَتْ وصُنِعَتْ أثناء الثورة الصناعية. رَسَّختْ تلك المقارَنات المعتقدات الدينية عادةً في سياق أنه كيف يمكن لمِثل هذه العمليات الحيوية الدقيقة أن تَحدُثَ دون تدخّل مُصَمِّمٍ ذكيّ عارِف مُطلَق؟

طَرَحَ القِّس ويليام بيلي William Paley سنة 1802 مثالًا ملَونًا لمثل هذا المنطق في التفكير عنما طَلَبَ مِنّا أن نفكّر بأننا وَجَدنا ساعةً بينما كنا نمشي في طريق، إذا فتَحنا الساعةَ وفحَصنا تَركيبَها الميكانيكي المعقَّد فسندركُ فورًا أنها صُمِّمتْ بقَصدِ قياسِ الوقت، وسيُقنِعنا ذلك بأن الساعة قد صَنَعَها صانِعٌ ذكيٌّ ماهِر، وحسبَ بيلي فإن المنطق نفسه يجب أن ينطَبقَ على العمليات الحيوية الدقيقة المعقَّدة.

نَعرفُ الآن أن أشكال الحياة المعقَّدة المليئة بنَوع من القَصد والغاية يمكن أن تَنشَأ دون وجود مُصَمِّمٍ من أي نوع كان، وأنها نتيجةٌ للانتقاء الطبيعي.

الانتقاء الطبيعي هي العملية الخلّاقة المُشَدَّدَة التي نَشَأنا منها والتي نَشأ عنها التنوع المدهش في أشكال الحياة من حولِنا من ملايين أنواع الجراثيم المختلفة، إلى الفَكِّ المخيف لخنفساء الأيل، ومجسَّات قنديل البحر الضخم التي يَبلغ طولها ثلاثون مترًا، وأفخاخ النبات المفتَرِس المليئة بالسائل القاتل، إلى إبهام القرود الكبيرة المتَقابل مع أصابعها مثل إبهام البَشَر. وبدون الحاجة أبدًا إلى الابتعاد عن قوانين العِلم أو استِدعاء ظواهر خارقة للطبيعة فقد تمكَّن التطورُ بالانتقاء الطبيعي من توليد سلالاتٍ متزايدة التعقيد وكائناتٍ حَيَّة متنوعة. ظَهَرتْ أنواع مختلفة على مَرِّ دُهورٍ من الزمن، وسادَتْ وتَغيَّرتْ أشكالُها تمامًا بينما كانت تَبحثُ عن احتمالاتٍ جديدة، وتفاعَلتْ مع ظروفٍ بيئيةٍ مختلفة ومع كائناتٍ حَيَّة أخرى. جميع الأنواع، بما فيها الإنسان، هي في حالة تغيّر مستمر لتَنقَرِضَ في النهاية أو تَتطَور إلى أنواع جديدة.

بالنسبة لي، هذه القصة للحياة لا تَقلُّ روعَةً وإعجابًا عن أيّ أسطورةٍ في الخَلق. وبينما تُقدِّمُ لنا معظم الروايات الدينية أعمالًا خلّاقة مألوفة وعادية إلى حَدٍّ ما، وعلى مَرِّ فترات زمنية نستطيع

فَهمَها بسهولة، فإن التطور بالانتقاء الطبيعي يدفعُنا لتَخيّل أمورٍ في أقصى مناطق راحَتِنا، ولكنها أكثر عظَمَة كذلك. إنها عمليةٌ غير مباشرة تمامًا تسير على مراحل، ولكن عندما توضَع في امتدادٍ كبير في الزمن يَصعُبُ تَصَوّره، وما يُسميه العلماء أحيانًا "الزمن العميق"، فإنها تُصبِحُ أعظَمَ قوةٍ خِلّاقَة.

الشخصية العملاقة في التطور هو تشارلز داروين Charles Darwin عالِم الطبيعة في القَرن التاسع عشر الذي سافَر في كثير من أرجاء العالَم على السفينة بيغل *Beagle* التابعة للبحرية المَلَكية، وجَمَع عيّنات من النباتات والحيوانات والمُستَحاثات. سَجَّلَ داروين بحَماسٍ ملاحظات أيَّدتْ فكرةَ التطور وطَرحَ آليةً جميلة لتَفسيره هي الانتقاء الطبيعي. كتَبَ كل ذلك في كتابه الذي نُشِرَ سنة 1859 "أصلُ الأنواع". بين كل الأفكار العظيمة في عِلم الأحياء ربما تكون هذه أشهَرها، على الرغم من أنها ليست أكثرها فَهمًا.



تشارلز داروين Charles Darwin (1809-1882) رائد فكرة التطور بالانتقاء الطبيعي

لم يكن داروين أولَ مَن اقتَرحَ فكرة أنّ الحياة تطَورتْ مع الزمن، فكما ذَكَرَ في كتابه "أصل الأنواع" فإن أرسطو قد ناقَشَ فكرةَ أن أعضاء الحيوانات ربما تَظهَر أو تَختَفي على مر فترات طويلة من الزمن. كما أن العالِم الفرنسي جان بابتيست لامارك Jean-Baptiste Lamarck طَوَّرَ هذه الفكرة أكثر في أواخر القَرن الثامن عشر وناقَشَ أن أنواعًا مختلفة تَتعلَّق ببعضها بعضًا في سلسلةٍ من القَرابة، واقتَرحَ أن الأنواع تتغيّر تدريجيًا خلال عملية التأقلم واستِجابةِ شكلِها لتغيرات

البيئة والتغيرات في مكان مَعيشَتِها. وقد اشتُهِرَ مثالُهُ عن الزرافات التي تَطورتْ رقابُها الطويلة لأنها مع كل جِيل تَطاولَتْ أكثَر لكي تَصِلَ إلى الأوراق الأعلى على الأشجار، وبطريقةٍ ما انتَقلتْ نتائج هذا التَّطاول إلى نَسلِها الذي أصبَحتْ رقابُها أطول قليلًا. يتم التقليل من شأن أفكار لامارك هذه الأيام أحيانًا لأنه لم يتوصَّل بشكلٍ صحيح إلى تفاصيل عملية التطور، إلا أنه يَستحقُّ تقديرًا كبيرًا لتقديمِ واحِد من أوائل التقارير الشامِلة عن ظاهرة التطور ولو أنه لم يَشرَح سبَبها.

لم يكن لامارك وحيدًا في توقُّعاتِه عن التطور، فحتى في عائلة داروين نفسها، جُدُّه المتعدّد المَواهِب إيراسموس داروين Erasmus Darwin كان رائدًا مبكرًا لفكرة التطور، وكان لديه شعارٌ نُقِشَ على عَرَبَتِه باللغة اللاتينية: "*E conchis omnia*" ويَعني "كلُّ شيءٍ مِنَ الأصداف" ليُعلِنَ عن اعتقادِه بأنَّ الحياةَ تطورتْ من أسلافٍ أبسَط بكثير، مثل القطعة الرخوَة العَديمة الشكل داخِل صَدَفَتِها. ولكنه اضطر لرفعِها بعد أن اتهَمه عميدُ كتدرائية ليتشفيلد بأنه "أنكَرَ خالِقَهُ". أطاعَ إيراسموس لأنه كان أيضًا طبيبًا ناجحًا أدركَ أنه إذا لم يفعل ذلك فسيُخاطِر بخسارة مَرضَاه المحتَرمين الأغنياء. كما كان يُعتبَر آنذاك شاعرًا مشهورًا، وقد شَرَحَ نَظَريتَهُ في التطور بمقاطِع من قصيدتِه "مَعبَد الطبيعة":

"الأشكالُ الأولى ضئيلة لا تُرى بالعدسة المكَبِّرة

تتحركُ في الطين، أو تَخترقُ الماء

بينما تُزهِرُ أجيالٌ متتالية

تكتَسِبُ قوى جديدة، وأطرافًا أكبَر

وتَنشَأ أعدادٌ لا تُحصَى من النباتات

وعوالِمُ تتنفَّس من الزعانف، وأقدامٌ، وأجنِحة"

ربما لم تستمر سُمعَتُه كشاعر، وهذا مفهوم، ولكن سمعَتَه كعالِم قد استَمرتْ. وقد تَنبأتْ مقاطِعُهُ الشعرية بجوانبَ من الأفكار التي شَرَحَها وتوسَّع فيها حفيدُهُ الأكثر شهرة.

كان تشارلز داروين أكثر علمية ومَنهَجية في مقارَبَتِه للتطور، وكانت وسائلُهُ في التواصُل أكثر تماسُكًا، وقد عبَّر عن نفسه بالنَّثر وليس بالشِّعر. جمَعَ كميةً هائلة من البيانات والملاحظات من سِجِلِّ المُستَحاثات ومن دراساتِه للنباتات والحيوانات في وطَنِه وفي الخارج. نَظَّمَ كل هذه المعلومات ليقدِّم دليلًا قويًا على وجهَة نظَرِهِ التي اشترَكَ بها مع لامارك ومع جدِّهِ وغيرهما بأن الكائنات الحيَّة تتطور فِعلًا. قدَّمَ داروين أكثر من ذلك باقتراح الانتقاء الطبيعي كآليةٍ لعمل التطور. ربَطَ بين كل النقاط وأظهَر للعالَم كيف يمكن للتطور أن يَعمَل فعلِيًا.

تَعتَمد فكرةُ الانتقاء الطبيعي على واقِعِ أنَّ سلالاتِ الكائنات الحيَّة تُظهِر تَنوعًا، وعندما يكون سبَب ظُهورِ هذه التَّنويعات طَفراتٌ وراثية فإنها ستَنتَقل وراثيًا من جيل إلى جيل. ستؤثِّر بعضُ هذه التنويعات على صفاتٍ تجعلُ أفرادًا مُعيَّنيين أكثر نجاحًا في انتاجِ نَسلِهم. يؤدي هذا النجاح في التكاثر إلى زيادة عدد الأفراد الذين يَحمِلون هذه التنويعات في الأجيال التالية وسيُشكِّلون نسبةً أكبر في السُّلالة. فمثلًا، في حالة الزرافة الطويلة العُنُق يمكننا تقدير أن الظُّهور العَفوي العَشوائي لزيادة طول الرَّقَبة وتراكُم التَّنويعات التي تغيِّر بمَهارة الهيكلَ العظمي والعضلات في الرَّقَبة سمَحَ لبعض أسلافِ الزرافة بالوصول إلى أغصان أعلى بقليل، وتَناول أوراق أكثر وغذاء أفضَل. وبالنهاية، فإن أولئك الذين يُثبِتون أنهم أكثر صمودًا وقدرَة على التَّناسل يُولِّدون أجيالًا مثلها من الزرافات، وبالتدريج تُسيطِر الزرافات الطويلة العُنُق على قطعان الزرافات التي تتَجَول في سهوب أفريقيا. تُعرَفُ هذه الآلية بالانتقاء الطبيعي لأن القيودَ المَفروضَة التي تَضَعها جميع أنماط العوامل الطبيعية، مثل التنافس على الطعام، أو في التزاوج، أو وجود أمراض وطفيليات، تضمَن معًا تفَوقَ بعض الأفراد في البقاء وبالتالي في التَّناسل أكثر من الآخرين.

اقتُرِحَت الآليةُ نفسها بشكلٍ مستقل من طَرَف عالِم الطبيعة ألفرد والاس Alfred Wallace. ولا يَعرفُ كثيرون بأنَّهما (والاس وداروين) اتَّبَعا توقعات سابقة عن الانتقاء الطبيعي عُرِفَتْ في أوائل ذلك القَرن، بشكلٍ خاص من المُزارِع الاسكتلندي باتريك ماثيو Patrick Matthew في كتابٍ نَشَرَهُ سنة 1831 عن الأخشاب. ومع ذلك كان تشارلز داروين أول من وَضَع الفكرة الكاملة بطريقة مُقنِعَة شامِلَة قوية بشكلٍ دائم.

في الحقيقة، كان الإنسان قد استَخدَم هذه الآلية منذ آلاف السنين في تَهجين كائناتٍ حَيَّة ذات صفات خاصة مَرغوبة، وهو ما يسمى بالانتقاء الاصطناعي (أو التَّهجِين)، وقد طَوَّرَ داروين

أفكارَهُ عن الانتقاء الطبيعي في الحقيقة بمراقبة الطريقة التي كان يَنتَقي بها مربُّو الحَمام أفرادًا من الحَمام ليَسمَحوا لها بالتكاثر ويَحصلوا بذلك على سلالاتٍ مَرغوبة من الحَمام. يمكن الحصول على نتائج باهرة بالتَّهجين (الانتقاء الاصطناعي)، وهي الطريقة التي استَطَعنا من خلالها تغيير الذئاب الفضّية البرّية إلى أفضَل صديق للإنسان والحصول على سلالات الكلاب المَرغوبة الصغيرة من نوع Chihuahua والضخمة من نوع Great Dane. وهي كذلك الطريقةُ التي غَيَّرنا بها نباتَ الخَردل البرّي إلى أنواع البروكلي والكُرُنب وغيرها. حدثَتْ هذه التغييرات خلال فترةٍ قصيرة نسبيًا وفي عدَدٍ قليلٍ من الأجيال وهي تُعطِينا لمحَةً عن القوة العظيمة في عملية التطور عندما يُسمَح لها بالعمل طبيعيًا على مر ملايين السنين.

يؤدي الانتقاء الطبيعي إلى بقاءِ الأصلَح وهو بالمناسبة ليس اصطِلاحًا استَخدَمَهُ داروين، كما يؤدي إلى حَذفِ الأفراد الذين لا يستطيعون المنافَسة. تتراكَمُ تغيراتٌ وراثية معيّنة نتيجةً لهذه العملية تؤدي مع مرور الزمن إلى نشوء تغيّرات دائمة في الشّكل وفي الوظائف التي تقوم بها الأنواع الحيَّة. ويمكن أن تفسِّر كيف تطَورتْ لدى بعض الخنافس البُقَع الحمراء والسوداء في غطاء أجنحَتِها، بينما اتَّجهتْ خَنافِسُ أخرى نحو السباحة، أو لدَحرَجَة كُراتِ الرَّوث، أو للتَّوَهُّج في الظلام.

الانتقاء الطبيعي فكرةٌ قوية ذات أهمية أبعَد من عِلم الأحياء، وفيها قوةٌ تفسيرية وتطبيقات عملية في تخصّصات أخرى مثل الاقتصاد وعلوم الكومبيوتر. في هذه الأيام مثلًا، بعضُ جوانب برامج الكومبيوتر وبعضُ الأجزاء الهندسية في الآلات، مثل الطائرات، يتم تَحسينُها وِفقَ أنظمةِ حلولٍ حسابية متتالية تشبه الانتقاء الطبيعي. تتطَور هذه المُنتَجاتُ تطَورًا تدريجيًا أكثر من أنها تُصَمَّمُ بالمَعنى التقليدي.

لكي يَحدُثَ التطور بالانتقاء الطبيعي يجب أن تتَمتَّع الكائناتُ الحيَّة بصفاتٍ ثلاث أساسية:

أولًا، يجب أن تستطيع التكاثر.

ثانيًا، يجب أن يكون لديها نظامٌ وراثي يتم فيه نَسخُ المعلومات التي تُحدِّد صفات الكائن الحَيِّ ونَقلها وتَوريثها خلال عملية التكاثر.

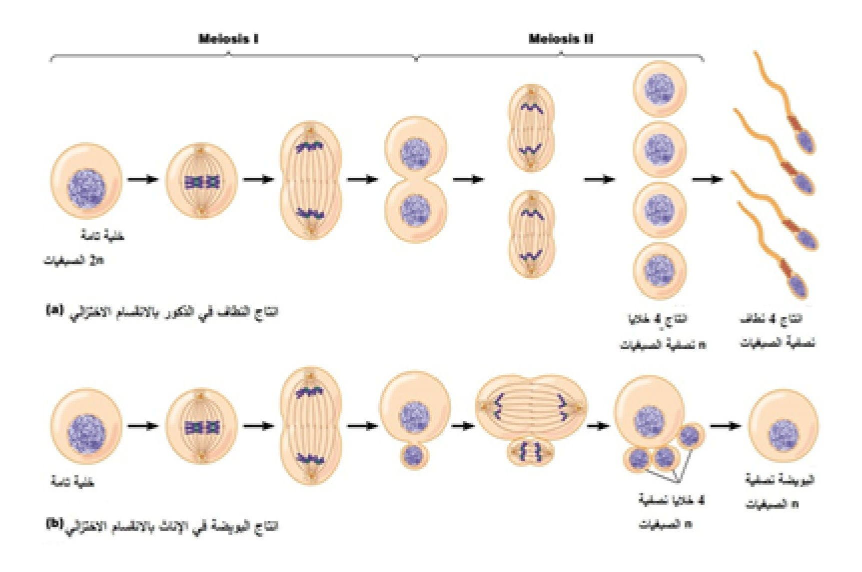
ثالثًا، يجب أن يَسمحَ نظامُ الوراثة بظُهور التَّنويع، وأن يتم تَوريثُ التَّنويعات خلال عملية التكاثر، لأن الانتقاءَ الطبيعي يَعملُ على انتقاءِ التَّنويعات الناجحة، وهو يُحَولُ نَشأةَ تنوعٍ بطيئةٍ

عشوائيةٍ إلى أشكالِ الحياة التي تبدو غير مَحدودَة ودائمة التَّغيُّر والتي تَزدَهِر مِن حولِنا.

ولكي تتم هذه العملية بكفاءة أيضًا يجب أن تَموتَ الكائنات الحَيَّة. فبهذا يتمكَّن الجيلُ التالي الذي يتمتَّع بالتنوع الوراثي الذي مَنَحَهُ مِيزةً تنافُسِيةُ من الحُلول مَحلّ الجِيل الذي سَبَقَهُ.

تَتحقَّق الصفاتُ الضرورية الثلاث مباشرةً في الخلية والمُوَرِّثَة (الجِين). تَتكاثرُ جميعُ الخلايا في دَورة الخلية، ولَدى جميع الخلايا نظامٌ وراثي يتألف من مُوَرِّثات (جِينات) يتم نَسخُها وتَوريثُها على الصّبغيات خلال الانقسِام المتَساوي وانقسِام الخلية. تَنشَأ تنويعاتٌ بظُهورِ طَفرات عشوائية تؤدي إلى تغيّر في تسلسل الحمض النووي DNA، مثل تلك التي قادَتْني لاكتشافِ المُوَرِّثَة cdc2. تَنشَأ هذه التغيرات في الحمض النووي إما من أخطاء خلال نَسخِ اللولب الثُّنائي، أو بسبب ضَررٍ بيئيّ على الحمض النووي DNA. تقومُ الخلايا بإصلاح هذه الطَّفرات، إلا أنها لا تَنجَح دائمًا في ذلك. ولو نَجَحتْ دائمًا لأصبحَ جميعُ الأفراد في كل نوعٍ متماثلين تمامًا وتوقَّفَ التطور. وهذا يعني أن معدل تغيّر الحمض النووي ذاته يَخضَع أيضًا للانتقاء الطبيعي، فلو كان معدّل التغيّر مرتفعًا فستَتلاشَى المعلوماتُ المَخزونة في المادة الوراثية وتَصبِح بلا مَعنى، وإذا كان معدّل التغيّر ضَئيلًا جِدًا فسيَنخَفضُ احتمال حدوث التغيّر التّطوري. وعلى المَدى الطويل، فإن أصلَح الأنواع وأكثرها نجاحًا في البَقاء ستكون تلك الأنواع التي تَحتَفظ بالتوازن المناسب بين الثَّبات والتَّغيّر.

في الكائنات الحيَّة المعقَّدة الحقيقية النواة أُضيفَتْ قدرةٌ أخرى على التنوع خلال عملية التكاثر الجنسي عندما تَختلط أجزاءٌ من الصّبغيات خلال انقسِام الخلايا التي تُنتِجُ خلايا التكاثر الجنسي (المعروفة باسم خلايا البذرة: النّطاف والبويضَات في الحيوانات، وحُبيبات الطَّلع والبُذيرات في النباتات). تُصنَعُ خلايا التكاثر الجنسي أثناء انقسامٍ خاص يَحدثُ في هذه الخلايا يسمى: الانقسام الاختِزالي *Meiosis*. وهذا هو السبب الرئيسي الذي يؤدي إلى اختلاف الإخوة والأخوات وراثيًا عن بعضهم بعضًا. فإذا كانت مُوَرِّثات الوالِدين مثل مجموعة وَرَقِ اللّعب، ففي عملية التكاثر يُعطَى منها لكلِّ وَلَدٍ مَجموعةً مختلِفةً من الأوراق.



رسم توضيحي لمراحل الانقسام الاختزالي في الخلايا التناسلية التي تُنتج النطاف والبويضات

هناك كثيرٌ من الكائنات الحيَّة الأخرى التي أَدخَلَت التنويعات عن طريق تبادل الحمض النووي DNA بطريقة مباشرة بين أفراد مختلفين، وهذا مُتَّبَعٌ كثيرًا في الكائنات الأبسَط مثل البكتيريات التي تستطيع تَبادل مُوَرِّثاتٍ بين بعضها بعضًا، ويمكن أن يَحدُثَ ذلك في كائناتٍ أكثر تعقيدًا. تسمى هذه العملية: النَّقل الأفقيّ للمُوَرِّثات. وهو أحد أسباب الانتشار السريع لمُوَرِّثات مقاومة المضادّات الحيوية عند بعض البكتيريات إلى سلالاتٍ كامِلة منها، بل وإلى أنواع أخرى مختلفة من البكتيريات. الانتقالُ الأفقي للمورثات يُصعِّبُ أيضًا تَتَبُّعَ بعضِ السلالات إلى الوراء على خَطٍّ زَمَن التطور لأنه يَعني أنَّ انتِقال المُوَرِّثات قد يَنتَشِر من أحَدِ فروع شَجَرةِ تَطَوُّرِ الحياة إلى فَرعٍ آخر.

مهما يكن مَصدَر التنوع الوراثي إلا أنه يجب أن يستمر في عمليات التكاثر التالية لكي يُنتِج التغير التطوري، ويجب أن يُنتِجَ سلالات من الكائنات الحيَّة التي تتَنوع في كل اتجاه ممكِن سواءً كان ذلك اختلافات بسيطة في مقاومة مَرَض، أو جاذبية للتزاوج، أو تَحمّل لبعض أنواع الغذاء، أو أيّ عدد من الصفات الأخرى. يَعمَل الانتقاءُ الطبيعي بَعدَ ذلك على اصطِفاء التغيّرات المفيدة وإنهاءِ التغيّرات الضّارة.

إحدى النتائج العميقة للتطور بالانتقاء الطبيعي هي أن جميع أشكال الحياة متَعلِّقَة ببعضها بعضًا في الأصلِ والنَّسَب. وهذا يعني أنه لدى تَتبُّع شجرةِ الحياة إلى أصلِها، تتلاقى الأغصانُ

والفروع بشكلٍ متزايد إلى أغصان أكبر وأخيرًا إلى جَذعٍ واحِد. والاستِنتاج بالتالي هو أننا نحن البَشَر نقتَرِبُ في النَّسَب إلى جميع أشكال الحياة الأخرى في هذا الكوكب. نحن أقرَب إلى بعضِها، مثل القرود، لأننا على فروعٍ متَقارِبة على أطرافِ شَجرةِ الحياة، بينما نَبتَعِدُ عن أشكال حياة أخرى، مثل الخَميرَة الانشطارية التي درَستُها، حيث تكون علاقةُ القَرابَة أبعَد بكثير ولا "نلتَقي" بها إلا في فترةٍ أبعَد بكثير في الزمن، وأقرَب إلى الجَذع الرئيسي لشجرة الحياة.

أدرَكتُ ارتباطاتِنا الأساسية بأشكال الحياة الأخرى عندما قمتُ برحلةٍ عَبرَ الغابة الاستوائية الرّطبة الخضراء في أوغندا بَحثًا عن غوريلا الجبال. كنتُ أسيرُ وراء دَليلي عندما شاهَدْنا فجأة عائلةً منها. وجدتُ نفسي جالِسًا في مواجَهةِ غوريلا ضخمة من ذوات الظَّهر الفضيّ. كان جالِسًا تحت شجَرة على بُعد مِترَين أو ثلاثة مِنّي. تصَببتُ عَرَقًا ليس فقط بسبب الحرارة المرتفعة والرطوبة العالية. كنتُ أعرِفُ كعالِمِ وراثة أنني أشترَكُ معه بحوالي 96% من مُوَرِّثاتِنا، إلا أن هذا العَدَد الجاف لا يروي سوى جزء من القصة. نظَرَ إليَّ بعينيه البُنّيتَين الذكيتَين العَميقتَين، والتَقتْ نظراتُنا. شاهدتُ جوانب كثيرة من إنسانيتي تَنعَكسُ نحوي. كانت تلك القرود الضخمة منسَجِمة جِدًا مع بعضها بعضًا، ومتَناغِمة أيضًا مَعَنا نحن البَشَر. ظَهَرتْ كثيرٌ من تصرفاتها مألوفَةً تمامًا، وكان تَعاطُفُها وفُضولُها واضِحًا. تأمَّلنا بعضَنا أنا وفضِيِّ الظَّهر دقائقَ عدَّة بَدَتْ وكأنها مُحادَثَة. ثم مَدَّ يدَهُ وثَنَى غُصنَين قُطرُ كلٍّ منها حوالي خمسة سنتيمترات (هل كان يحاول أن يقول لي شيئًا؟) ثم تسلَّقَ الشجرةَ ببطءٍ وهو يُتابِعُ نظرَتَه نحوي باستمرار بعَينَيهِ النَّفاذَتَين. أكَّدَتْ لي تلك المواجَهة الدرامية المثيرة جيدًا كم نحن قَريبِين من هذه الكائنات الضخمة. تَمتَدُّ هذه القَرابة فيما وراء الغوريلات إلى قرود أخرى، وإلى الثدييات وغيرها من الحيوانات، وحتى إلى نباتات وجراثيم من خلال تفَرعاتٍ أقدَم في شجرةِ الحياة المشتَرَكة. هذه الملاحظاتُ بالنسبة لي هي واحدةٌ من أفضَل الأسباب لماذا يَجِبُ على الإنسانية أن تهتمَّ بكامل البيئة الحيوية، لأن جميع أشكال الحياة المختلفة التي نَشتَرِكُ معها في هذا الكوكب هي مِن أقارِبنا.

أصبحتُ أكثر وَعيًا لقَرابَتنا العميقة مع الكائنات الحيَّة الأخرى بطريقةٍ غير متوقَّعة عندما قَررتُ أن أبحثَ فيما إذا كانت الخَميرة الانشطارية والخلايا البَشَرية تُسيطِرُ على دَورات خلاياها بالطريقة نفسها. طَرحتُ هذا السؤال في الثمانينيات عندما وجَدتُ نفسي أعمَل في معهد لدراسة السرطان في لندن. بما أن السرطان يَنشَأ نتيجةَ خللٍ في انقسام خلايا الإنسان، فمِن المفهوم أن معظم زملائي العامِلين في مختبرات أخرى كانوا أكثر اهتمامًا بمَعرفة ما الذي يتحكَّم بدَورة الخلية عند

الإنسان وليس في الخَميرة الانشطارية. كنتُ قد عَرفتُ آنذاك أنَّ الذي يتحكَّم بانقسام الخلية في الخَميرة هي المُوَرِّثَة cdc2 التي تُسيطِرُ على دَورة الخلية، تلك المُوَرِّثَة المهمّة ذات الاسم غير المُلهِم.

تساءلتُ فيما إذا كان انقسام الخلية الإنسانية يتم التحكّم به كذلك بنسخَةٍ إنسانيةٍ من المُوَرِّثَة cdc2 ذاتها؟ كان ذلك يبدو احتمالًا بعيدًا بالنظر إلى الفروق الكبيرة بين الخَميرة والإنسان، وأن آخر نَسَبٍ مشترَكٍ بينهما ربما كان منذ 1.2 إلى 1.5 بليون سنة. لتقدير تلك الفَترة الهائلة من الزمن ووضعِها في سِياقِها، فقد انقَرضَت الديناصورات منذ حوالي 60 مليون سنة، وظهَرتْ أولى الحيوانات البسيطة منذ حوالي 500-600 مليون سنة. إذا أردتُ أن أكون صادقًا تمامًا، فربما يُثير الضحك تَصَوُّرُ أن تلك القَرابة البعيدة قد تكونُ فيها خلايا تتم السيطرة على تكاثرها بالطريقة ذاتها. ومع ذلك فقد كان علينا أن نبحَث.

حاولَتْ زميلَتي في المختبر ميلاني لي Melanie Lee الإجابةَ على هذا السؤال بالبحث عن مُوَرِّثَةٍ إنسانية تَعملُ بالطريقة التي تَعملُ بها المُوَرِّثَة cdc2 في الخَميرة الانشطارية. ولكي تَدرُسَ ذلك أخَذَتْ خلايا من الخَميرة الانشطارية لديها خَللٌ في المُوَرِّثَة cdc2 فلا تستطيع الانقسام، "ونَثَرَتْ" عليها "مكتبة" من المُوَرِّثات التي تؤلِّفُ عدةَ آلاف من قِطَعِ الحمض النووي DNA الإنساني. احتَوتْ كل قطعة من الحمض النووي على مُوَرِّثَة إنسانية واحدة. طبَّقتْ ميلاني في التجربة ظروفًا تضمَن أن كل خلية من خلايا الخَميرة المُتَغيّرة تلتَقِطُ عادةً مُوَرِّثَة واحدَةً أو اثنتَين فقط. إذا تصادَفَ أنَّ واحدةً من هذه المُوَرِّثات كانت النَّظير الإنساني للمُوَرِّثَة cdc2، وإذا كانت تَعملُ بالطريقة نفسها في الإنسان وفي الخَميرة الإنشطارية، وإذا تمكَّنَت المُوَرِّثَة الإنسانية cdc2 من الدخول إلى خلايا الخَميرة، فربما استَعادَتْ خلايا الخَميرة المتغيّرة قدرَتَها على الانقسام. إذا سارَتْ كلُّ هذه العمليات بشكلٍ صحيح فستَنشَأُ سلالاتٌ من الخَميرة ستَتمكَّن ميلاني من رؤيتها تحت المجهر. لعلكَ لاحَظتَ وجودَ كثيرٍ من "إذا" في هذه الخطّة، فهل ظَننا أن هذه التجربة ستَنجَح؟ ربما لا، ولكنها جديرة بالمحاوَلة.

ولدهشتنا فقد نجَحَت التجربة! نَمَتْ سلالاتٌ في أطباق بتري واستَطَعنا عَزلَ شريطِ الحمض النووي الإنساني الذي نجَحَ في العَمل مكان المُوَرِّثَة cdc2 الضرورية لانقسام خلايا الخَميرة. درَسنا تسلسل الحمض النووي في هذه المُوَرِّثَة الإنسانية المجهولة ووَجَدنا أن تسلسل البروتين الذي تُوَجِّهُ

صُنعَهُ كان مماثِلًا تمامًا للبروتين المُناظِر له في الخَميرة. كان واضِحًا أننا ننظُرُ إلى نسختَين قريبتَين جِدًا من المُوَرِّثَة نفسها. كانتا قَريبتَين جدًا بحيث أن المُوَرِّثَة الإنسانية نَجَحتْ في التحكّم بدَورة خليةِ الخَميرة.

قادَتْنا هذه النتيجة المفاجِئة إلى استنتاجات بعيدة المدى، فبالنظر إلى أن الخَميرة الانشطارية والإنسان بعيدان جدًا عن بعضهما بعضًا في مَسيرة التطور فمن المحتمل جدًا أن خلايا كل حيوان وفطر ونبات على كوكب الأرض يتحكّم في دَورة الخلية بالطريقة ذاتها. ومن المؤكّد أنها اعتَمدَت جميعًا على عَمَلِ مُوَرِّثَة مشابِهة جدًا للمُوَرِّثَة cdc2 في الخَميرة. والأبعَدُ من ذلك هو أنه عندما تطوَّرتْ هذه الكائنات الحيَّة المختلفة تدريجيًا عَبَر دُهورٍ من زمنِ التطور لكي تأخُذَ أشكالًا مختلفة لا تُحصَى، وأساليب حياة لا تُعَدّ، فإن جَوهَر التحكّم في هذه العمليات الأساسية لم يتغيّر كثيرًا. صَمَدَت المُوَرِّثَة cdc2 واستَمرتْ أكثر من بليون سنة.

رسَّخَ كلُّ هذا قناعَتي بأنَّ فَهمَ كيفية تحكّم خلايا الإنسان بانقسامها يمكن أن يُدرَسَ بكفاءةٍ في مَجالٍ واسِعٍ من الكائنات الحيَّة بما فيها الخَميرة البسيطة. وأنَّ مَعرفةَ انقسامِ الخلية أساسيةٌ لفَهمِ كيفية تغيّر أجسامِنا في نموها وتطورها وأمراضها، وكيف تتهالكُ خلال حياتنا.

لا يَحدُثُ الانتقاءُ الطبيعي فقط خلال التطور، بل يَحدُثُ أيضًا على مستوى الخلايا في أجسامنا. يَبدأ السرطان عندما عندما تَتعطَّل أو يتغيّر ترتيب مُوَرِّثاتٍ ضرورية للتحكّم في نمو وانقسام الخلايا، مما يؤدي إلى انقسام بعض الخلايا بشكلٍ غير منضبط، ويَحدُثُ ذلك أيضًا في التطور ضمن سلالةٍ من كائنات حيّة. إذا نَجَتْ أو تَملَّصَتْ هذه الخلايا السرطانية أو ما قَبلَ السرطانية غير المُنضَبِطَة من أجهزةِ الدفاع في مَناعة الجسم فإنها تَسودُ تدريجيًا على الخلايا الطبيعية المنضَبِطَة في النسيج الخلوي الموجودة فيه. عندما تتكاثر وتنمو سلالةُ الخلايا غير المنضَبِطَة يزدادُ احتمال حُدوثِ مزيدٍ من التغيّرات الوراثية في هذه الخلايا، مما يؤدي إلى تراكم الطَّفرات الوراثية المُخَرِّبة وتتزايد أجيال الخلايا السرطانية المشاكِسة النشيطة.

توجَدُ في هذه العملية الصفات الثلاث الضرورية للتطور بالانتقاء الطبيعي: التكاثر ونظام الوراثة وقدرة نظام الوراثة هذا على التنوع. ومن التناقض أن الظروف ذاتها التي سمَحَتْ للحياة الإنسانية بالتطور أصلًا هي المسؤولةُ أيضًا لحُدوث واحدٍ من أكثر أمراض الإنسان فَتكًا بِهِ. وبشكلٍ

عملي أكثر فهذا يعني أيضًا أن علماء الأحياء الذين يَدرسون السكان والتطور يجب أن يتمكَّنوا من المُساهَمة بدرجةٍ مهمّة في مَعرفَتِنا وفَهمِنا للسرطان.

يستطيعُ التطورُ بالانتقاء الطبيعي أن يُنتجَ التعقيد الكبير والقَصدَ الظاهري للكائنات الحيَّة. ويستطيع تحقيقَ ذلك دون وجودِ ذكاءٍ مُتحَكِّم، أو هَدفٍ نهائي مُحَدَّدٍ، أو قوة مقدَّسَة مُطلَقَة. إنه يَضَعُ جانبًا ونهائيًا كل مناقَشةٍ تَستدعي خالِقًا مقدَّسًا مثلما فَعَلَ بيلي بساعَتِهِ المُتَخَيَّلَة، ومثلما ناقَشَ كثرون غيره قَبله وبَعده. يَتركُني هذا في حالَةٍ من الإعجاب والتساؤل المستمر.

مَنحَني العِلمُ طريقًا إلى فَهمٍ للعالَم أكثر عقلانية. كما مَنحَني أيضًا قَناعَةً أكبر، وحتى استقرارًا وطريقَةً أفضَل للسَّعي وراء الحقيقة، وهي الهدف النهائي للبحث العلمي.

يَصِفُ التطور بالانتقاء الطبيعي كيف يمكن أن تَنشَأ أشكالٌ مختلفة من الحياة وتَبلُغَ هدَفَها. تُحَرِّكُهُ الصُّدفَة وتُوجِّهُهُ ضرورةُ إنتاج أشكالٍ حَيَّة أكثر كفاءة، إلا أنه لا يُعطِي كثيرًا من الرؤية حول كيفية عَمل الكائنات الحيَّة. لمَعرفة ذلك، يجب علينا الانتقال إلى الفكرتَين التاليتَين، والأولى هي الحياةُ ككيمياء.

4 - الحياة كيمياء

النظام من الفوضى

ربما ينظُرُ معظم الناس إلى العالَم مِن حولِهم ويقسِمونَه إلى نوعَين رئيسيَين من الأشياء: الكائنات الحيَّة، والأشياء التي تبدو بوضوح أنها ليست حيَّة (جامدة). تَبرُزُ الكائنات الحيَّة بأنها أشياء ذات أعمال: فهي تتحرك بهَدَف وقَصد، وتَستَجيب لما حولَها، وتَتكاثر بنفسِها. لا تَنطِبق أي من هذه الأمور على الأشياء غير الحيَّة، مثل الحصاة أو الجبل أو الشاطئ الرملي. وبالفعل، لو رجعنا في الزمن مئتَي سنة قَبلَ أن تتطور الأفكار المَذكورة في هذا الكتاب، فلربما توصَّلنا كذلك إلى الاستِنتاج أن الحياة الأرضية تُسيطِر عليها قوى غامِضة لا توجَد إلا في الكائنات الحيَّة.

تُسمَّى هذه الطريقة في التفكير "مَذهَب الحَيوية Vitalism" وتَرجِعُ أصولُهُ إلى المفكّرين الكلاسيكيين القدماء مثل أرسطو وجالينوس وربما بعد ذلك. وحتى بالنسبة لأكثر العلماء عقلانية وعلمية بيننا، ليس من السهل التَّخلي تمامًا عن مثل هذا التَّفكير. لو شاهدتَ ذات يوم شخصًا يموتُ سَتدرِكُ أنه يبدو فعلًا وكأنما شَرارةٌ غامِضَةٌ من الحياة قد انطَفأتْ فجأةً.

تفسيراتُ مذهبِ الحيوية تبدو جذّابةً بسبب ما تقدِّمُهُ من حَلٍّ مريحٍ للصعوبة التي تَجِدُها عقولُنا في فَهمِ الموت. ولكننا نستطيع الآن أن نتأكّد من أننا لا نحتاج لاستِحضار أي شكل من السِّحر، فأغلب جوانب الحياة يمكن فَهمُها بشكلٍ جيد باصطلاحات الفيزياء والكيمياء، ولو أنها شكلٌ رائعٌ من الكيمياء العاليةِ الترتيب والتنظيم والتَّقدّم الذي لا يمكن مُجاراته بأية عملية غير حيوية. هذا التفسير بالنسبة لي هو أكثر إثارة للإعجاب والدهشة من أي اعتقاد بأن الحياة تُسَيِّرُها قوى غامضة لا يمكن أن يَصِلَها البحثُ والتمحيص العلمي.

من المفاجئ جدًا أن فكرة "الحياة كيمياء" تَرجِع أصولها إلى دراسات التَّخَمر، وهو العملية التي تَصنَعُ فيها الكحولَ ميكروباتُ التَّخَمر البسيطة أثناء انتاج البيرة والخَمر. اهتمَّ الإنسان بذلك منذ زمن طويل.

وفي الحقيقة فإن حياتي نفسها قد تأثَّرتْ كثيرًا بعملية التَّخَمر، ليس لأنني أحبُّ شربَ البيرة وأنا جالسٌ لوحدي أتأمَّلُ العالَم في خمَّارة فارغة ذات مساءٍ مبكر بسعادةٍ وحُبور. عندما أنهيتُ المدرسة في السابعة عشرة من عمري، عرفتُ أنني أردتُ دراسة عِلم الأحياء ولكنني لم أحصَل على مقعد في جامعة، ففي ذلك الوقت كان الحصول على شهادة أساسية في لغة أجنبية والنجاح في امتحان يُعرَفُ باسم المستوى O ضروريًا للدخول في أية دراسة جامعية، ولكنني رسبتُ في امتحان اللغة الفرنسية ستَّ مرات، وربما كان ذلك رقمًا قياسيًا للرسوب في تلك الشهادة الدراسية! ولذا لم أذهَبْ إلى الجامعة، بل ذهبتُ للعمل بدلًا عن ذلك كَفَنِّيّ في مختبر للجراثيم يرتبط بمَصنَع للبيرة.

كان جزءًا من عملي اليومي هو تحضيرُ جميع خَلطات المواد المغذّية التي يحتاج إليها العلماء لزَرعِ ميكروباتِهم. لاحظتُ سريعًا أنهم يضَعونَ دائمًا الطَّلبات اليومية ذاتها تقريبًا، فاستَطعتُ أن أحضِّرها كلها بالجُملة كل يوم اثنين بما يكفي الأسبوع بكامله. ذهبتُ للقاء رئيسي فيك نيفيت Vic Knivett (الذي كان يُمارسُ الرَّقصَ الجورجي في وقت فراغِه، وقد اكتشفتُ ذلك عندما وجدتُهُ ذات مساء يقوم برَقصةٍ تشبه رَقصَ القوزاق فوق إحدى طاولات المختبر!). تكرَّمَ باقتراحِ أن أقومَ بمشروعِ بحثٍ لدراسة إصابة بيض الدجاج بجرثومة السالمونيلا. كنتُ في الثامنة عشرة من عمري، وطار بي الخيال إلى السماء، وأجريتُ تجاربًا كل يوم وكأنني عالِمٌ حقيقي.

في أحد أيام تلك السنة في مصنع البيرة طَلَبَني للمقابلة بروفسور مُتعاطِف من جامعة بيرمينغهام أقنَعَ الجامعة في النهاية بالتَّغاضي عن ضَعفي في اللغات الأجنبية لكي أستطيع البَدءَ بدراسةِ عِلم الأحياء سنة 1967. ومن المفارَقة بالنظر إلى مصاعِبي الأولى في اللغة الفرنسية أنني بعد خمس وثلاثين سنة مُنِحتُ وسامَ جوقة الشرف من رئيس فرنسا تقديرًا لأبحاثي عن الخَميرة. بل واضطررتُ لتقديم خطابِ قبولي للوسام باللغة الفرنسية! على كل حال، بعد دراستي للخَميرة معظم حياتي إلا أنني لم أصنَع قطرةً واحدةً من النبيذ أو من البيرة.

بَدأ الدراسة العلمية للتَّخَمر العالِم الفرنسي النبيل أنتوان لافوازييهAntoine Lavoisier في القَرن الثامن عشر، وهو أحد رواد الكيمياء الحديثة. ولكن لسوء حظِّهِ وسوء حَظِّ العِلم كله فقد أدّى

نشاطُهُ الجانبي كمُحَصِّلٍ للضرائب إلى أن يَفقِد رأسَه في مايو 1794 أثناء الثورة الفرنسية. صَرَّحَ قاضي المحكمة السياسية الساخِرة التي حَكَمَتْ عليه أن "الجمهورية لا تحتاج إلى العلماء ولا للكيميائيين". يجب علينا نحن العلماء أن نتعامَل مع السياسيين بحذر! هناك مَيلٌ مؤسِفٌ لدى السياسيين، خاصة الشَّعبَويين منهم، لتَجاهل "الخبراء" خاصة عندما يُعارِضُ هؤلاء الخبراء آراءهم السيئة الواهية الأسباب.

قَبلَ أن يواجِهَ لافوازييه المِقصَلة التي جاءَتْ قَبلَ أوانِها، كان مهتمًّا بعملية التَّخمر، واستَنتَج "أن التَّخَمر هو عملية كيميائية يتحول فيها السُّكر في عصير العنب إلى الكحول الإثيلي في الخَمر الناضج". لم يفكّر أحدٌ قَبله عن ذلك بهذه الطريقة. تقدَّم لافوازييه أبعَدَ من ذلك واقتَرحَ وجودَ شيء أطلَقَ عليه اسم "الخَميرة" يبدو أنها تأتي من العنب نفسه، وأنها تلعَبُ دَورًا رئيسيًا في هذا التفاعل الكيميائي. إلا أنه لم يتمكّن من معرفة طبيعة هذه "الخَميرة".

أصبَحت الأمور أوضَح بعد نصف قَرن عندما طَلَبَ صُنَّاع الكحول من عالِم الأحياء الفرنسي لويس باستور Louis Pasteur أن يساعِدَهم في حَلِّ مشكلةٍ خَرَّبَتْ انتاجَهَم. أرادوا أن يَعرفوا لماذا يتَخرَّب تَخمير عجينةِ الشمندر السكري لديهم أحيانًا ويُنتِج حَمضًا سيئًا بدلًا من الكحول. انكَبَّ باستور على دراسة هذه المشكلة وكأنه مُحقِّقٌ بوليسي مستَخدِمًا المجهر الذي توصَّلَ به إلى مفتاح الحَلِّ الحاسم. لاحَظَ أن ترسبات عملية التَّخمير في البراميل التي تُنتِجُ الكحول كانت تحتوي على خلايا الخَميرة. كانت الخَميرة حيَّة بشكلٍ واضح لأن بعضَها أظهَرتْ أنها تتكاثر بنشاط، ولكن عندما فَحصَ البراميلَ الحامِضَة لم يُشاهِد أي خلايا من الخَميرة أبدًا. اقتَرحَ باستور استنادًا إلى هذه الملاحظات البسيطة أن الخَميرة بشكلِ حياتِها الجرثومي هي العامِل الغامِض الذي افتَرَضَهُ لافوازييه، وأنها العامل الرئيسي المسؤول عن صُنعِ الكحول. وربما ميكروبات أخرى، ربما بكتيريات أصغَر هي التي صَنَعَت الحمض الذي خَرَّبَ التحضيرات الفاشلة.

النقطة المهمّة هنا هي أن نمو خلايا حيّة كان المسؤولَ المباشر عن تفاعل كيميائي محدَّد. في هذه الحالة، كانت خلايا الخَميرة تَحول السُّكر إلى كحول. أهم شيء فَعلَه باستور هو الانتقال من الخاص إلى العام لكي يتوصَّل إلى استِنتاج جديد مهمّ. اقتَرَحَ أن التفاعلات الكيميائية ليست مجرد صِفة مثيرة للحياة الخلوية، بل هي من الصفات الأساسية للحياة. لَخَّصَ باستور ذلك ببراعة وذكاء عندما قال: "التفاعلات الكيميائية هي تعبيرٌ عن حياة الخَلية".

نَعلمُ الآن أن في داخل خلايا جميع الكائنات الحيَّة تَحدُثُ مئات بل آلاف التفاعلات الكيميائية في الوقت نفسه. تَبني هذه التفاعلاتُ جزيئات الحياة التي تُشكِّل مُكَونات وهياكل الخلية. كما أنها تُفكِّك جزئيات أخرى لإعادة تدوير مُكَوِّنات الخلية وللحصول على الطاقة. يسمى مجموع التفاعلات الكيميائية بطَيفِها الواسِع التي تَحدُث في الكائن الحَيّ باسم "الاستقلاب أو الأَيضْ *Metabolism*" وهو أساسُ كل ما تفعله الكائنات الحيّة: الصيانة والنمو والتنظيم والتكاثر، وهو مَصدَرُ كل الطاقة اللازمة لتموين هذه العمليات. الاستقلاب هو كيمياء الحياة.

ولكن كيف تَحدُثُ كل هذه التفاعلات الكيميائية الكثيرة المختلفة التي تؤلّفُ الاستقلاب؟ ما هي تلك المادة التي كانت في خَميرة باستور التي تقوم بالتفاعل الكيميائي للتَّخمر؟ فتَّشَ عالِمٌ فرنسي آخر هو مارسلين بيرتيلوت Marcelin Berthelot أكثر عمقًا في هذا اللغز وحقَّقَ التَّقدم التالي: سَحَقَ خلايا الخَميرة واستَخلَص من بقاياها مادةً كيميائية تصرَّفتْ بطريقة مثيرة للاهتمام، إذ أنها قامَتْ بتفاعلٍ كيميائي محدَّد هو تحويل السُّكر العادي إلى نوعَين من السّكر البسيط هما الغلوكوز والفركتوز (سكر العنب وسكر الفواكه)، إلا أنها لم تُستَهلَك في حَدِّ ذاتِها خلال هذا التفاعل. كانت مادةً خاملة ولكنها مساهِمَة في عمليةٍ حيوية، ومن المهم أيضًا أنها استَمرتْ في العمل بَعدَما استُخلِصَتْ خارجَ الخلية. أُطلِقَ على هذه المادة الجديدة اسم "المُحَوِّلَة Invertase".

المُحوِّلَة هي إنزيم، والإنزيمات هي مُحَفِّزات، أي أنها تُساعِد وتُسرِّع تفاعلات كيميائية معيَّنة، وبشكلٍ كبير غالبًا. وهي ضرورية للحياة، فبدونها بكل بساطة لا تَحدُثُ كثيرٌ من العمليات الكيميائية الضرورية للحياة، خاصة في درجات الحرارة المنخفضة نسبيًا والظروف المعتدلة داخل الخلايا. وضَعَ اكتشافُ الإنزيمات أساسَ الاجماع الموجود هذه الأيام بين جميع علماء البيولوجيا أنّ معظمِ ظواهر الحياة يمكن فَهمها كتفاعلات كيميائية تُحفِّزها إنزيمات. لكي نَفهَم كيف تقوم الإنزيمات بذلك نحتاج إلى فَهمِ طبيعتها وكيف تُصنَع.

تتألفُ معظم الإنزيمات من بروتينات تَصنَعُها الخلية بشكلِ جزيئات من سَلاسِل طويلة تسمى البوليمرات Polymers. شَكلُ البوليمرات مهمٌّ بشكل أساسي في كل ناحية من كيمياء الحياة، وذلك لأن معظم الإنزيمات، وجميع البروتينات الأخرى، وجزيئات الدهون التي تشكّل جِدار الخلية،

وجميع الدهون والكاربوهيدرات التي تُخَزِّنُ الطاقة، والحموض النووية المسؤولة عن الوراثة، والحمض النووي DNA وقَرِيبُهُ الحمض النووي RNA، كلها بوليمرات.

تتألفُ هذه البوليمرات من ذَرَّاتٍ لخَمسة عناصر فقط هي: الكربون والهيدروجين والأوكسيجين والنيتروجين والفوسفور. وبين هذه العناصر يَلعَبُ الكربون دَورًا مَركزيًا خاصًا مُهِمًا لأنه أكثر تَعدُّدِيّة من العناصر الأخرى. فبينما ذَرَّةُ الهيدروجين مثلًا تستطيع المشارَكة برابِطَةٍ كيميائية واحدة مع ذَرَّاتٍ أخرى، فإن كل ذَرَّةٍ مِنَ ذَرَّات الكربون تستطيع الارتباط بأربَعِ ذَرَّاتٍ أخرى، وهذا هو مفتاح قدرة الكربون على تشكيل البوليمرات. تستطيعُ ذَرَّتَانِ مِنَ الكربون الارتباطَ بذَرَّتان أخريتَين من الكربون عادةً ليُشكلوا معًا نواةً لسلسلةٍ من الذَّراتِ المترابطة في كل بوليمر. يترِكُ هذا الترابط لكلِّ ذَرَّة كربون رابطتَين متاحَتَين للارتباط بذرات أخرى. يمكن أن تُستخدَم هذه الروابط المُتاحَة لإضافة جُزيئات أخرى إلى جوانب سلسلة البوليمر الرئيسية، وهكذا دواليك.

كثير من البوليمرات الموجودة في الخلايا هي جزيئات من سلاسل طويلة، وفي الواقع تكون طويلة جدًا لدرجة أنها تسمى: الجزيئات الضخمة Macromolecules. لكي تأخذ فكرة عن طول هذه الجزيئات، تذكَّر أن الجزيء الضخم للحمض النووي DNA الموجود في قَلبِ كل واحد من صُبغياتكَ قد يَبلغُ طولُهُ عدة سنتيمترات، وهذا يعني أنها تتألف من ملايين ذَرَّات الكربون في سلسلةٍ هائلةِ الطول ولكنها تؤلِّفُ خيوطَ جُزيئاتٍ نحيلةٍ بِشَكلٍ لا يُصدَّق.

بوليمرات البروتينات ليست طويلة جدًا بشكل عام وتتألف عادة من بضع مئات إلى بضعة آلاف ذَرَّة كربون مترابِطَة، وعلى كل حال فإنها أكثر تنوعًا بكثير من جُزيئات الحمض النووي DNA وهو السبب الرئيسي لقُدرتِها على العمل كإنزيمات، وبالتالي تَلعَب دَورًا رئيسيًا في الاستقلاب. يتألفُ كل بروتين من بوليمر أساسُهُ ذرَّات كربون مترابِطَة في سلسلةٍ تضمُّ إليها سلسلةً طويلة من جُزيئات الحموض الأمينية الصغيرة واحِدًا تِلوَ الآخر. فمثلًا، إنزيم المُحَوِّلَة Invertase هو جُزيء بروتين يتألفُ من تَرابُط 512 حمضٍ أميني في تسلسلٍ مُحدَّد.

تَستخدِم الحياةُ عشرين حمضًا أمينيًا مختلفًا، لكل منها جُزيئات جانبية تتفَرَّع عن سلسلة البوليمر الرئيسية تَمنَحُها خواصّ كيميائية متميّزة. فمثلًا، بعضُ الحموض الأمينية لها شُحنَة كهربائية موجِبة أو سالِبة، وبعضُها إما تَنجَذب إلى الماء أو تَصُدُّ عنه، وبعضُها يستطيع الارتباط

بسهولة أكبر مع جُزيئات أخرى. تقوم الخلايا بربطِ مجموعات مختلفة من الحموض الأمينية التي يَحمِل كل منها جُزيئات جانبية مختلفة، وتَصنَع بذلك طَيفًا واسِعًا من بوليمرات بروتينات مختلفة.

بعد أن تُجمَع السلاسل الخَطِّية لبوليمرات البروتينات، تَنطَوي وتَلتَوي على نفسِها وتَرتَبط في بعض مناطِقها لتشكّل هياكلَ معقّدة ثلاثية الأبعاد. يُشبِهُ ذلك إلى حَدٍّ ما طَيَّ حَبلٍ طويل من شريطٍ لاصِق بشكلِ كُرة متشابِكة، إلا أن طريقة طَيّ البروتينات عمليةٌ يمكن تَحديدُها بدقّة وتَصنَعُ هياكلَ ذات أشكال محدَّدَة دقيقة. وتُصنَعُ في الخلية كل سلسلة بروتين ما مِنَ الحموض الأمينية ذاتِها دائمًا وتُطوى بالشَّكلِ المُحدَّد نفسه. هذه القفزة في الانتقال من شِكلِ السلسلة إلى الشَّكل الثلاثي الأبعاد هي خطوةٌ حاسِمة لأنها تعني أن كل بروتين له شَكلٌ فيزيائي مُحدَّد وصفات كيميائية مُحدَّدة. نتيجةً لذلك تستطيع الخلية صُنعَ إنزيماتٍ بطريقة تَجعلُ كل إنزيم يتَناسَبُ تمامًا مع المواد الكيميائية التي يَعمَلُ عليها، فمثلًا تتوافَقُ أجزاء من إنزيم المُحَوِّلَة تمامًا مع جزيئات السّكر. يَسمَح هذا للإنزيمات بتوفير الظروف الكيميائية المُحدَّدَة اللازمة لتَسيير تفاعلات كيميائية معيَّنة.

تُنَفِّذُ الإنزيماتُ تقريبًا جميع التفاعلات الكيميائية التي تشكّل أساسَ الاستقلاب الخَلَوي. وبالإضافة إلى صُنعِ جُزيئات أخرى وتَفكيكِها، تَلعَبُ الإنزيماتُ أدوارًا أخرى أيضًا، فهي تَقومُ بما يُشبه مُراقبَةَ الجودَة وتَنقلُ المُكَوِّنات والرسائل بين مناطق مختلفة داخل الخلية، كما تَنقلُ جُزيئاتٍ أخرى إلى داخل وإلى خارج الخلية. تقومُ بعض الإنزيمات الأخرى بدَور مراقبَة الغُزاة، وتُنَشِّطُ البروتينات التي تُدافِعُ عن الخلية وتَحمي بذلك أجسامَنا من المَرض. والإنزيمات ليست النوع الوحيد من البروتينات، لأن كل جزء تقريبًا من أجسامِنا، من الشَّعر على رؤوسِنا إلى الحَمض في مَعداتِنا والعَدَسات في عيوننا... إما مَصنوعَة من البروتينات أو أنَّ البروتينات تقوم بصُنعِها. شُحِذَتْ جميع هذه البروتينات المختلفة على مَرِّ آلاف السنين من التطور لتؤدي وظائف معيَّنة داخل الخلية، وحتى الخلية البسيطة نسبيًا تضمُّ عدَدًا هائلًا من جُزيئاتِ البروتينات. هناك أكثر من 40 مليونًا منها في خلية خَميرةٍ صغيرة، أي أن خليةً ضئيلة منها تضمُّ أكثر من ضعف عدد سكان مدينة ضخمة مثل بكين!

نتيجة وجود كل هذا التنوع في البروتينات، هناك فَورَةٌ من التفاعلات الكيميائية التي تقوم بها كل خلية دائمًا. لو تخيلتَ النظر داخل خلية حيَّة بعيونٍ تستطيع أن تَرى عالَم الجُزيئات، ستفاجَئ حواسكَ بثورةِ غليان النشاط الكيميائي. بعض الجزيئات المتفاعلة تَحمِل شحناتٍ كهربائية تجعلها

تتجاذَب أو تتَنافَر، بينما بعضُها الآخر مُحايِد. بعضُها حامِضيّ، وبعضها الآخر قلويّ، وتتفاعل جميع هذه المواد المختلفة باستمرار إما بالتَّصَادم العَشوائي، أو باللقاءات المُرتَّبة. تلتَقي بعضُ هذه الجزيئات بشكلٍ عابِر لتتفاعل كيميائيًا من خلال تبادل سريع لالكترونات أو بروتونات. وفي أحيان أخرى تَظَلُّ الجُزيئاتُ مترابطةً كيميائيًا بتشكيل روابِط قوية دائمة. تَجري في الخلية بضعة آلاف من التفاعلات الكيميائية المختلفة التي تَنشَط باستمرار للمحافَظة على الحياة، وبالمقارَنة، يبدو عدد التفاعلات الكيميائية المُستخدَمة حتى في أكبر المَصانع الكيميائية ضئيلًا جدًا. فمثلًا، ربما يقومُ معمل بلاستيك على عشراتٍ من التفاعلات الكيميائية فقط.

تَحتلُّ كل هذه التفاعلات المَحمومة السريعة الطَّرفَ الآخر البعيد في الزمن حين كانت ضرورية لتطور هذا النظام، ولكن مقياس الزمن المذهل في عالَم الخلية يتحدَّى عقولَنا في فَهمِه مثلما يتَحدَّاها زمن التطور. بعضُ إنزيمات الخلية التي تتحكّم بهذه التفاعلات تَعملُ بسرعةٍ مدهِشة وتتعامل مع آلاف بل حتى ملايين التفاعلات الكيميائية كل ثانية، إلا أن هذه الإنزيمات ليست سريعةً جدًا فقط، ولكنها دقيقة جدًا في الوقت نفسه وتستطيع التعامل مع ذرَّات منفردة بدرجة من الدِّقة والمَوثوقية لا يستطيع المهندسون الكيميائيون إلا أن يَحلموا بها، إلا أن التطور كان يعمل على تحسين هذه العمليات بلايين السنين، قَبلَ الإنسان بكثير!

وَضعُ مجموعِ كل ذلك للعمل بنجاح هو إنجازٌ استثنائي، وعلى الرغم من أن المجموعة الواسعة من التفاعلات الكيميائية التي تَحدُثُ معًا في الخلايا قد تبدو فوضَوية وعَشوائية إلا أنها في الحقيقة مرتَّبة جدًا، ولكي تَعمل جيدًا يَحتاجُ كلّ من التفاعلات المختلفة لظروفه الكيميائية الخاصة. يَحتاجُ بعضها حموضَة أو قلوية أكثر، ويتطَلَّب غيرها وجودَ شَوارِدَ كيميائية محدَّدة مثل الكالسيوم أو المغنيسيوم أو الحديد أو البوتاسيوم، وبعضُها يحتاج إلى الماء وبعضُها الآخر يُصبِحُ أبطَأ بوجود الماء، ومع ذلك فإن جميع هذه التفاعلات الكيميائية المختلفة يجب أن تَجري في الوقت نفسِه وبالقرب من بعضَها بعضًا داخل الخلية المُتناهية في الصِّغَر. لا يمكن تحقيقُ ذلك إلا بفضل الإنزيمات المختلفة التي لا يحتاج كل منها ظروفًا مختلفة جدًا من درجة الحرارة أو الضغط أو الحموضَة أو القلوية كتلك التي تحتاجها مَعامِلُ الكيمياء الصناعية. ولو كانت الحالة كذلك لما أمكَن تواجدها كلها معًا داخل الخلية. وعلى كل حال، تحتاج كثير من هذه التفاعلات الاستقلابية إلى إبقائِها منفَصِلة عن بعضها بعضًا، ويجب ألا تتقاطَع، وأن تُحافِظ على احتياجاتِها الكيميائية الخاصة. ومفتاح الإجابة على هذا التحدي هو في التجزئة *Compartmentation*.

التَّجزئةُ والفَصل في حُجَيرات هي طريقةٌ تسمحُ بعَمل أنظِمةٍ معقَّدة من كافة الأنواع. انظُر مثلًا إلى المُدن، فهي لا تعمل بكفاءة إلا إذا نُظِّمَتْ في دوائر مختلفة لوظائف معيَّنة: محطات قطارات، مَدارس، مستشفيات، مَصانع، مراكز شرطة، محطات توليد كهرباء، مواقِع التعامل مع النفايات... وهكذا. تحتاج المدينة إلى كل ذلك وأكثر لكي تَعملَ بشكل متكامل، ولكن كل شيء سيتَعطَّل إذا اختلَطَت الأمور مع بعضها بعضًا. يجب أن تكون الوظائف منفصِلة لكي تعمل بكفاءة، ولكنها في الوقت نفسه يجب أن تكون متقاربة ومترابِطَة. ينطَبقُ ذلك بالمِثل على الخلايا التي يجب عليها أن تكون مجموعات منفصِلة من الظروف البيئية المَحَلية الصغيرة المنفِصلة عن بعضها بعضًا، إما بمسافةٍ فيزيائية أو زمنية، وبكونها يجب أن تكون مترابطِة ومتواصِلة. تُحقِّقُ الكائنات الحيّة ذلك بإنشاء أنظمَةٍ من حُجَيرات متفاعِلة توجَد بشكلِ طَيفٍ من المجالات، مِنَ الكبير جدًا إلى المُتناهي في الصِّغَر.

ربما تكون أكبر هذه المقاييس أكثرها إلفَةً مثل النُّسُج والأعضاء المختلفة في الكائنات الحيَّة كثيرة الخلايا كالنباتات والحيوانات، مِثلكَ أنتَ ومِثلي. تكون هذه المَقصورات أو الحُجَيرات المنفصِلة مَصنوعَة حسبما تحتاجه كل عمليةٍ كيميائية أو فيزيائية محدَّدة، فالمعدة والأمعاء مثلًا تقوم بهَضمِ المواد الكيميائية في الطعام، ويقومَ الكَبد باستِخلاص السّموم الكيميائية والأدوية، ويَستخدِم قلبكَ الطاقةَ الكيميائية لضَخّ الدم.. وهكذا. تَعتَمد وظائفُ هذه الأعضاء جميعها على الخلايا والنُّسُج المتخصِّصَة التي تتألفُ منها، فمثلًا، خلايا بِطانة المَعدة تُفرِزُ الحَمض، بينما خلايا عضلة القلب تتقلَّص. وجميع الخلايا هي حُجُيرات في حَدِّ ذاتِها.

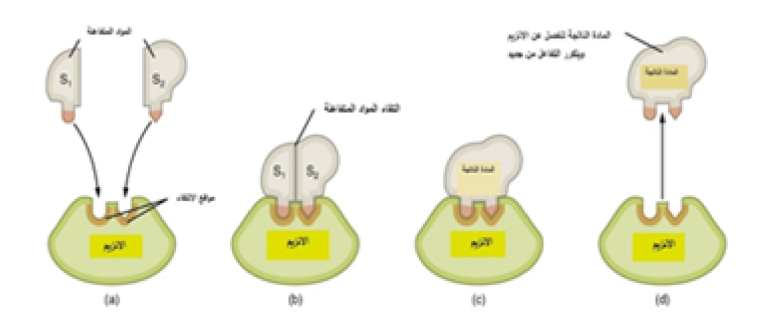
في الحقيقة، إن الخلية هي المِثال الأساسي للتَّجزئة في الحياة. الدَّور الأساسي لجِدار الخلية الخارجي هو المحافَظة على محتويات الخلية مَفصولَة عن العالَم. وبفضل قدرة هذا الجِدار على الفَصل والعَزل تَستطيعُ الخلايا الاحتفاظَ بجزيرةٍ من النظام الكيميائي والفيزيائي. لا تستطيع الخلايا المحافَظة على هذه الحالَة إلا لفترة مؤقَّتة بالطبع، وعندما تتوقَّف عن العمل، تَموتُ وتَستولي الفوضى عليها وتَستعيد قَبضَتها على الأمور.

تحتوي الخلية ذاتها على طبقاتٍ متتالية من الحُجَيرات، أكبرُ هذه الحُجَيرات هي العُضَيَّات المُحاطَة بأغشِية مثل النواة والميتوكوندريا. ولكن قَبلَ أن نتَعرَّفَ على كيفية عمل هذه الحُجَيرات،

نحتاجُ أولًا للتركيز على المستوى الأبسَط لبوليمرات الكربون، لأن الحُجَيرات الأكبَر كلها مَبنِيَّةٌ منها وبفَضلِ خصائص هذه المُكَوِّنات الكيميائية.

أصغَرُ المُكَوِّنات الكيميائية في الخلية هي سُطوحُ جُزيئات الإنزيمات نفسها. لكي تقدِّرَ مَدَى صِغَرِ هذه الجُزيئات، انظُر إلى الشُّعيرات الصغيرة على ظاهِر يَدِكَ فهي من أنحَف الهياكل التي يمكنكَ رؤيتَها بالعَين المُجَرَّدَة، إلا أنها هائلةً بالمقارَنة مع بروتينات الإنزيمات، فعَلَى قُطرِ كل شَعرَةٍ من هذه الشُّعيرات يمكن أن يَصطَفَّ جَنبًا إلى جَنبٍ ألفَين من جزيئات إنزيم المُحَوِّلَة.

يقدِّم كل جُزيء من بروتينِ إنزيمٍ مسافاتٍ مغلقةً ومواضِعَ التِحام ورُسُوٍّ ذات أشكال مُحدَّدة مفصَّلة بالضبط على مستوى الذَّرات المنفَرِدَة للارتباط بجُزيئات معيَّنة تعمل معها. هذه الهياكل الرائعة صغيرة جدًا ولا يمكن رؤيتها مباشرة حتى بأقوى المَجاهر الضوئية، ويجب على الباحِثين فَهمُ أشكالِها وخواصِّها باستِخدام تقنياتٍ مثل دراسة البلّورات بالأشعة السّينية واستِخدام المجهر الإلكتروني التي توسِّعُ قدراتِ حواسِّنا لدرجةٍ هائلة وتَسمحُ لنا بتَحديد مَواقع وخواصّ مئات وآلاف الذَّرات المَصنوعَة مِنها. يتمكّن الباحِثون بَعدَها من رؤية تفاعل الإنزيمات مع المواد الكيميائية التي تتعامل معها. تُسمى هذه المواد الكيميائية بالرَّكائز أو المواد المُتفاعِلَة *Substrates*. تتطابَقُ الإنزيمات مع رَكائزِها مثلما تَتطابَقُ قِطَعُ أُحجِيَةٍ صغيرةٍ ثلاثية الأبعاد. عندما تَجتمعُ قِطَعُ الأحجِية يُحجَزُ التفاعل الكيميائي عن بقية مناطق الخلية في زاويةٍ مناسبة وظروفٍ كيميائية مواتِيَة بالضبط لكي يَقومَ الإنزيم بعَمَلِهِ الدقيق كالجراحة الذَّرية ويتعامل مع كل ذَّرة ويُرَكِّبُ أو يُفكِّكُ روابِطَ جُزيئية مُحدَّدة. فمثلًا يقوم إنزيم المُحَوِّلَة بفَصلِ رابِطَةٍ واحدة معيَّنة بين ذرَّة أوكسجين وذرَّة كربون في وسَط جُزيء السّكر.



رسم توضيحي يبيّن تفاعل المواد مع الإنزيمات لصنع مواد جديدة، وتظهر أهمية التكامل في أشكال المواد المتفاعلة

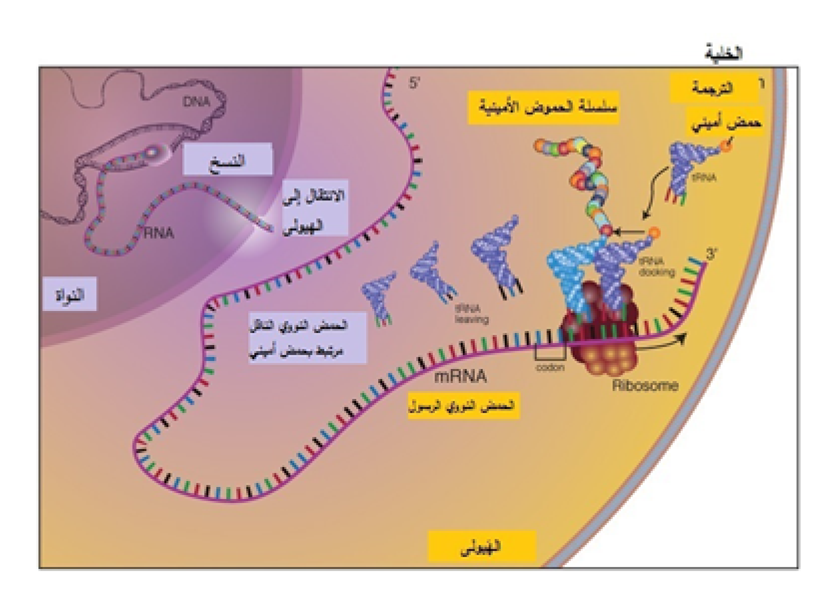
تستطيع الإنزيمات أن تعمل معًا لتَضمَن أنَّ نتيجةَ تفاعلٍ واحِدٍ تَمُرُّ مباشرةً لكي تُصبِحَ رَكيزَةً للتفاعل التالي، وبهذه الطريقة يمكن إجراء سلسلة كاملة من التفاعلات الكيميائية اللازمة في عملية معقَّدة مِثل تلك التي تَلزَمُ لتَركيبِ الأغشية الدهنية أو غَيرها من المُكَوِّنات الكيميائية المعقَّدة بجَمعِ مُكَوِّناتٍ أبسَط بطريقةٍ مُنسَّقَة. يُسمّي علماءُ الأحياء هذه السلاسل من العمليات المعقَّدة من التفاعلات الكيميائية: مَسارات الاستقلاب. تَشمَلُ بعض هذه المَسارات كثيرًا من الخطوات المنفَصِلة، وتَعملُ مِثلَ خطوطِ التَّجميع في مَصنَعٍ حيث يَجِبُ أن تتمّ كل مَرحَلة قَبلَ أن يتحرك العمل إلى المَرحَلة التالية.

تستطيع الإنزيمات أن تَعمَل معًا أيضًا للقيام بوظائف تركيب أكثر تعقيدًا مِثل نَسخِ الحمض النووي DNA بدقّة متَناهِية. يمكن تَصَوُّرُ الإنزيمات التي تقوم بذلك كأنها آلاتٌ جُزَيئية ضئيلة عالية الدقّة والمَوثوقية في عملياتها. تَستخدِم بعضُ هذه الآلات الجُزَيئية طاقةً كيميائية لتقوم بعملٍ فيزيائي في الخلية، وهذا يَشملُ بروتيناتٍ تتصَرَّف وكأنها "محرِّكات" جُزَيئية تُغَذّي بالطَّاقة معظم حركات الخلايا ذاتها ومختلف المَواد والمُكَوِّنات داخل الخلايا. تعمل بعضُها مثل سائقِين مُرسَلِين لِنَقلِ مُكَوِّناتٍ خَلَوية ومواد كيميائية إلى أجزاء أخرى من الخلية حيث توجَدُ الحاجَةُ لها. تعمل ذلك باتّباع المَسارات المعقّدة التي تتقاطَع داخل الخلية مثل شبكة قطارات مُتقَنَة التفرع مَصنوعَة أيضًا من بروتينات. صَنَعَ باحثون أفلامًا عن هذه المُحرِّكات الجُزَيئية الضئيلة وهي تَعملُ فَتُرى وهي "تَسيرُ" بين أرجاء الخلية وكأنها ربوتات صغيرة. لهذه المُحرِّكات آليات تَوجيهٍ تجعلها تتحرك إلى الأمام وتُساعِدها على تَجنّب الخروج عن المَسار باصطِدامات عشوائية مع جُزيئاتٍ أخرى.

تَخلقُ أنواعٌ أخرى من هذه المحركات الجُزَيئية القوى اللازمة لفَصلِ الصّبغيات وقَطعِ الخلايا المُنقَسِمَة إلى نِصفَين. وعلى الرغم من أن كلًا منها ضئيلٌ جدًا، ولكن عندما تعملُ بلايين منها معًا داخل ملايين من خلايا العضلات فإن هذه المُحرِّكات الجُزَيئية هي التي تُحرِّكُ أجنحةَ الفراشات الصفراء وهي تَخفُقُ في حدائِقنا، وتُمكِّنُ أعينَنا من مُتابَعة الكلمات على هذه الصفحة، وتمكّن الفهود من الجَري بسرعاتٍ كبيرة. إن تجميع التأثيرات الصغيرة للبروتينات المفرَدَة وهي تعمل بأعداد هائلة في كثير من الخلايا يؤدي إلى النتائج التي نراها حولَنا في العالَم الحقيقي.

بمقياسٍ أكبر قليلًا من الإنزيمات المنفَرِدة والآلات الجُزَيئية، تستطيعُ مجموعاتٍ من البروتينات الالتقاءَ فيزيائيًا مع بعضها بعضًا لتشكّل مجموعةً من الأجهزة الخَلَوية التي تُنظِّم عمليات كيميائية أكثر تعقيدًا. من أهمّ هذه الأجهزة الخَلَوية هي الريبوزومات التي تَصنَع البروتينات. يتألَّف كل ريبوزوم من عشرات البروتينات مع بعضِ الجُزيئات الكبيرة من الحموض النووية. الريبوزومات أكبرُ من الإنزيمات النموذجية، وربما يكفي صَفٌ مئاتٍ قليلةٍ منها لتَغطِيَةِ عَرضِ شُعيرَة بدلًا من عدة آلافٍ من الإنزيمات، إلا أنها ماتزال ضئيلةً جدًا لكي تُرى بدون مجهرٍ الكتروني. تحتاج الخلايا التي تَنمو وتَتكاثر إلى كمياتٍ كبيرة من البروتينات، ولذا تحتوي كل منها بضعة ملايين من الريبوزمومات.

لكي يَصنَعَ الريبوزوم جُزَيئًا من البروتين يجب أن يَقرَأ الشيفرة الوراثية لمُوَرِّثَة معيَّنة ويُترجِمَها إلى إبجَديةِ البروتينات المؤلَّفة من 20 حَرفًا من الحموض الأمينية. تَصنَعُ الخليةُ أولًا نسخة من مُوَرِّثَة معيَّنة، وتتألَّف النّسخة من الحمض النووي RNA الذي يَعملُ كناقِلٍ لرسالة فيُسمى: الحمض النووي النَّاقل لأنه يَنتَقل فيزيائيًا من المُوَرِّثات في النّواة إلى الريبوزومات في الهَيولى حامِلًا معه نسخةً من معلوماتِ المُوَرِّثَة. يَستخدِم الريبوزوم الحمضَ النووي النَّاقل كقالَب في صُنعِ البروتين الذي يوافِقُهُ تمامًا وذلك برَبطِ الحموض الأمينية بالترتيب الذي تُملِيهِ المُوَرِّثَة. تَضمَنُ الريبوزومات صُنعَ ظُروفٍ مَحَلية دقيقة عالية التَّكوين في عمليةِ البِناء المتعدِّدَة المَراحل والتي تُشارِكُ فيها إنزيماتٌ كثيرة لتَتِمَّ بِدِقَّةٍ وسُرعَةٍ، إذ يحتاجُ كل ريبوزوم إلى دقيقةٍ واحدة تقريبًا لبِناء بروتين متوسط يتألَّف من حوالي 300 حَمضٍ أميني.



مخطط مراحل صنع البروتينات في الخلايا الحية يظهر فيه نَسْخ الحمض النووي الرسول mRNA عن الحمض النووي DNA في نواة الخليّة، وانتقاله إلى الريبوزوم (الجسيمات الدقيقة) في الهَيولى، حيث تَصل إليه الحموض الأمينية مرتبطةً بالحمض النووي الناقل tRNA، وتصطف بالترتيب الذي يُحَدِّده تسلسل الحمض النووي الرسول لصنع سلسلة البروتين المطلوبة

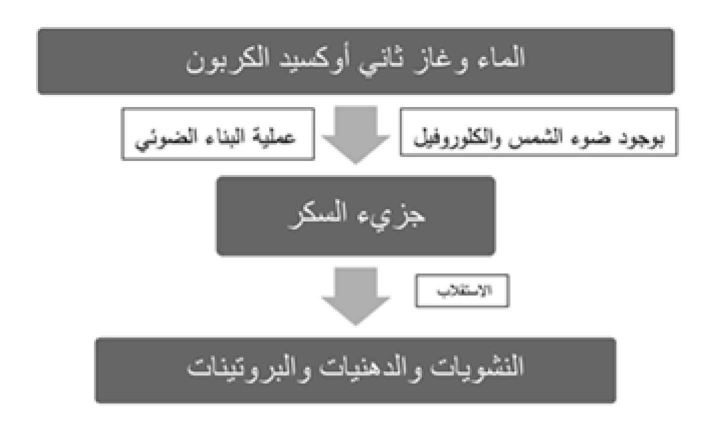
أما عُضَيَّات الخلية فهي أكبر بكثير من الريبوزومات ولكنها تَظَلُّ ضئيلةً جدًا بالمقارنة مع الأشياء التي يراها الإنسان، وتوجَد كلّ منها ضِمنَ غِشائِها الدُّهنيّ الخاص الذي يُحيطُ بها. تَضمَنُ هذه العُضَيّات الطَّبَقَةَ التالية اللازمة لعملية التَّجزئة وتَشكيل الحُجَيرات في الخلايا الحقيقية النواة. تقَعُ في قَلبِ كلِّ خليَّة من هذا النوع من الخلايا عُضَيَّةٌ مهمةٌ نَعرفُها باسم النَّواة. تكون النَّواة عادةً أوضَحُ مُكَوِّناتِ الخلية تحت المجهر. معظم الخلايا صغيرةٌ جدًا، إذ يكفي صَفُّ خليتَين أو ثلاث من كريات الدم البيضاء مثلًا لتَغطِيَةِ عَرضِ شُعيرَةٍ واحدةٍ من الشُّعيرات التي تُغَطِّي ظاهِرَ يَدِكَ، والنَّواة أصغَر من الخلية بالطبع، إذ تَشغلُ النَّواة حوالي 10% من حجم كُرَيَّة الدم البيضاء مثلًا. ولكن تذكَّر أنه في داخل هذه النّواة الضئيلة جِدًا تُوجَدُ نسخةٌ كاملة من معلوماتكَ الوراثية بشَكلِ شَريطٍ مُلتَفٍّ من الحمض النووي DNA فيه 22000 مُوَرِّثَة تقريبًا، ويَبلغُ طوله حوالي مترَين لو تَمَّ نَشرُهُ تمامًا.

جميع النشاطات الكيميائية المختلفة التي تحافِظ على حياة الخلايا تحتاج إلى الطّاقة، بل وكثير من الطّاقة في الواقع. الغالبيةُ العظمى من أشكال الحياة حولنا الآن تَستمِدُ طاقَتَها في الأصل من الشمس، وذلك ما تفعله البلاستيدات الخضراء، وهي عُضَيَّاتٌ أخرى ضرورية للحياة، ولكنها على العَكس من النّواة فهي لا توجَد في الخلايا الحيوانية، وإنما توجَد فقط في الخلايا النباتية والأُشنيّات Algae. البلاستِيدات الخضراء هي التي تقوم بالبِناء الضَّوئي Photosynthesis وهو مجموعةُ التفاعلات الكيميائية التي تَستخدِمُ الطاقَةَ المُستَمَدَّة من أشعة الشمس لكي تُحوِّلَ الماء وثاني أكسيد الكربون إلى سُكّر وأوكسجين.

تترتَّبُ الإنزيماتُ اللازمة للبِناء الضَّوئي في طَبقَتَي الغشاء الذي يحيط بكل بلاستيدة خضراء. كل خلية من خلايا أوراق العشب في الحديقة المُجاورة لمنزلكَ تحتوي على مئات من هذه العُضَيّات الكُرَوية تقريبًا، وتحتوي جَميعُها على بروتين عالي التَّخصُّص يُسمى الكلوروفيل. بروتينات الكلوروفيل هي التي تُعطِي العُشبَ لَونَهُ الأخضر فهي تَمتَصُّ الطاقة من مَوجاتِ اللون

الأزرق والأحمر في طَيفِ ضَوء الشمس وتَستخدِمها في الطَّاقة التي يحتاجها البناء الضوئي وتَعكسُ موجات اللون الأخضر.

تَستخدِمُ النباتاتُ والأُشنِيّات وبعض البكتيريات التي تستطيع القيام بالبناء الضوئي السُّكريات البسيطة التي تُنتِجَها كَمَصدَرٍ مباشر للطاقة وكذلك كمواد بناء أساسية لصُنعِ جُزيئاتٍ أخرى تحتاج إليها للحياة. كما أنها تُنتِجُ السُّكريات والكربوهيدرات التي تأكُلها كائناتٌ حيَّةٌ أخرى كثيرة مثل الفطور التي تتغَذى على الخشب المُتحَلِّل، والخِراف التي تأكل الأعشاب، والحِيتان التي تَبتَلِعُ أطنانًا من الأحياء الدقيقة (البلانكتون) التي تقوم بالبناء الضوئي في المحيطات، وجميع المحاصيل الغذائية التي يعيش عليها البشر في قارّاتِ عالَمِنا. في الحقيقة، إن الكربون الضروري جِدًا لبِناء كل جُزءٍ من أجسامِنا يأتي في الأصل من عملية البناء الضوئي. يبدأ أصلًا بشكل غاز ثاني أكسيد الكربون الذي يُسحَبُ من الهواء في التفاعلات الكيميائية التي تتم في البِناء الضوئي:



مَنَحَتْ كيمياءُ البِناء الضوئي الطاقةَ والمواد الخام لبِناء معظم الحياة على الأرض هذه الأيام، كما لَعِبَتْ دَورًا حاسِمًا في صُنعِ تاريخ كوكبنا. يبدو أن الحياة قد ظَهَرتْ أولًا منذ حوالي 3.5 بليون سنة، وهو عُمرُ أقدَم المُستَحاثات المُكتَشَفة حتى الآن والتي كانت ميكروبات وحيدة الخلية ربما استمدَّتْ طاقَتَها من حرارة الأرض الداخلية. لم يوجَد بِناءٌ ضوئي خلال الفترة الأولى من الحياة على الأرض، ولم يتوفَّر مَصدَرٌ كبيرٌ للأوكسجين. نتيجةً لذلك لم يوجَد أي أوكسجين في الجَو تقريبًا. وعندما قابَلَتْ أشكالُ الحياة الأولى في الأرض الأوكسجين، كان مؤذِيًا لها.

على الرغم من أننا نَعتَقد بأن الأوكسجين ضروريٌّ للحياة، وهو كذلك بالفعل، إلا أنه غازٌ نشيطٌ جدًا كيميائيًا مما يؤدي إلى أذيّة مواد كيميائية أخرى، بما فيها البوليمرات الضرورية للحياة كالحموض النووية. ولكن عندما تطَوّرتْ لدى الميكروبات القدرةَ على القيام بعملية البِناء الضوئي، فقد تكاثَرتْ على مَرِّ آلاف السنين لدَرجة أنَّ كميةَ الأوكسجين ارتفَعتْ في الجَو مما أدّى لحدوث "كارثةُ الأوكسجين الكبرى" في الفترة من 2 بليون إلى 2.5 بليون سنة. جميع الكائنات الحيّة الموجودة آنذاك كانت من الميكروبات، إما من البكتيريات أو من الميكروبات العتيقة. إلا أن بعضَ الباحِثين يَعتَقدون بأن معظَمها قد انقَرَضَ بظُهورِ كل ذلك الأوكسجين. من المفارَقة أن الحياة قد صَنعَتْ ظُروفًا بيئية كادَتْ أن تقضي على الحياة كلها. إلا أن قِلَّةً من أشكال الحياة استَمرتْ في البقاء، إما بالانسحاب إلى مناطق لا تَتعرّض فيها للأوكسجين في قاعِ المحيط، أو عميقًا تحت الأرض، أو كان عليها أن تتأقلَم بتطَور كيمياء جديدة ضرورية للإزدِهار في عالَمٍ غنيٍّ بالأوكسجين.

في هذه الأيام، مازالتْ كائناتٌ حيّة مثلنا نحن البَشَر تتعامَل بحَذر مع الأوكسجين، إلا أننا نَعتَمد عليه تمامًا لأننا نحتاج إليه في الحصول على الطاقة من السّكريات والدّهون والبروتينات التي نتَناولها أو نَصنَعها أو نَمتَصّها. يتم ذلك بعملية كيميائية تُسمى التَّنَفس الخَلَوي. تَحدُثُ المراحلُ الأخيرة من هذه المجموعة من التفاعلات في الميتوكوندريات، وهي عُضَيَّاتٌ أخرى ضرورية جدًا لجميع الخلايا الحقيقيات النواة.

الدَّور الرئيسي للميتوكوندريات هو توليد الطاقة التي تحتاجها الخلايا لتَشغيل التفاعلات الكيميائية للحياة. ولذلك تحتوي الخلايا التي تَحتاجُ إلى كميةٍ كبيرة من الطاقة على أعداد كبيرة من الميتوكوندريات، فلكي تحافِظ على نَبضَاتِ قلبكَ يجب أن تحتوي كل خلية في عضلة قلبكَ على بضعة آلاف من الميتوكوندريات. تَشغُلُ بمجموعها حوالي 40% من الحَيِّز المُتاح في خلايا القلب. بتَعبيرٍ كيميائي بَحتٍ فإن التنفس الخَلَوي يَعكِسُ عمليةَ البِناء الضوئي، إذ يتفاعل السّكر والأوكسجين مع بعضهما بعضًا لتَكوين الماء وثاني أوكسيد الكربون والحصول على كمية كبيرة من الطاقة التي يتمّ تَخزينُها للاستعمال فيما بَعد. تَضمَنُ الميتوكوندريات أن تتمّ هذه التفاعلات المتعدِّدة الخطوات بانضباطٍ تام، وأن تَحدُثَ بتَرتيبٍ وتدرُّجٍ دقيق دون خسارة كمية كبيرة من الطاقة، ودون أن يَهربَ الأوكسجين والالكترونات وتؤذي بقية الخلية.

تَرتكَزُ الخطوةُ الرئيسية في الحصول على الطاقة في التنفس الخَلَوي على حركَة البروتونات، وهي ذرَّاتُ الهيدروجين المنفَرِدَة التي أُخِذَ منها الكترون لتُصبِحَ شِحنَتُها الكهربائية موجِبة. تُدفَعُ البروتونات من مركز الميتوكوندريا إلى الفَجوة بين الغِشاءَين اللَّذَين يُحيطَا بكل ميتوكوندريا. يؤدي هذا إلى تراكُم بروتونات موجِبة الشّحنة خارجَ الغِشاء الداخلي للميتوكوندريا. على الرغم من أن ذلك يَنشَأ عن الكيمياء، إلا أنه عمليةٌ فيزيائية أساسية. يمكنكَ اعتِبارها مِثْلَ ضَخِّ الماء إلى الأعلى لملءِ سَدٍّ في محطة توليد كهرباء مائية يَسمَحُ لماءِ السَّدِّ بالتَّدفق إلى الأسفل عَبرَ توربيناتٍ تُحَوِّلُ طاقة الماء الحركية إلى طاقة كهربائية، أما في الميتوكوندريا فإن البروتونات المَدفوعَة وراء "سَدّ" الغِشاء تَتدفَّق إلى مركز الميتوكوندريا خلال قَنواتٍ مَصنوعَة من بروتينات تُمسِكُ بالطاقة التي يَصنَعُها تدفُّق البروتونات المَشحونة كهربائيًا وتُخَزِّنَها بشكلِ روابطَ كيميائية عالية الطاقة.

أولُّ شخصٍ فكَّر بأن الخلايا يمكن أن تُنتِجَ طاقَتَها بمِثلِ هذه الطريقة غير المتوقَّعَة كان عالِم الكيمياء الحيوية البريطاني بيتر ميتشل Peter Mitchell الحائز على جائزة نوبل. كان يعملُ في قسم عِلم الحيوان بجامعة إدنبرة حيث عملتُ فيما بَعد على دَورة الخلية في الخَميرة، ولكن عندما وصلتُ إلى تلك الجامعة كان قد غادرَها ليؤسِّسَ مختبَره الخاص في جنوب غرب انكلترا. كان ذلك تصرفًا غير عادي، واعتَبَره بعضُهم أنه بريطاني متحيّز حقيقي. التقيتُ به عندما كان في أواخر السبعينيات من عمره وأعجبتُ بفضوله المتيقِّظ وحَماسِه للمَعرفة. تحدَّثنا في كثير من المجالات، وفوجئتُ بعقلِهِ الإبداعي وأعجِبتُ بتَجاهله للمُشَكِّكِين بِه وكيف تابَعَ طريقَهُ لكي يُثْبِتَ أن فِكرَتَهُ غير التقليدية كانت صحيحةَ.

هياكلُ البروتينات الصغيرة التي تَعملُ مثل "التوربينات" في الميتوكوندريا تبدو كأنها بالفعل مثل التوربينات في محطات توليد الكهرباء على الرغم من أنها مُصَغَّرَة بلايين المرات! عندما تتدفَّق البروتونات خلال التوربينات الجُزَيئية التي تحتوي على قناةٍ عَرضُها أقلّ من واحد على 10000 من الميليمتر، فإنها تُدَوِّرُ مِروَحَةً تماثلها في أبعادِها الجُزَيئية المُتَناهية في الصِّغَر. تُحَرِّكُ المِروَحَةُ الدَّوارةُ توليدَ رابِطَةٍ كيميائية مهمّة جِدًا لتَصنَعَ جُزيئًا جديدًا من مادةٍ تُسمَّى ATP Adenosine TriPhosphate (الأدينوزين ثلاثي الفوسفات). يَحدُثُ هذا بمعدّل سريع يبلغ 150 تفاعلًا في الثانية.

مادة ATP هي مَصدَر الطاقة العالَمي في الكائنات الحيَّة. تُخَزَّنُ الطاقةُ في كلُّ جُزَيءٍ من هذه المادة وتَعمَلُ مثل بطارية ضئيلة. عندما يحتاج تفاعلٌ كيميائي داخلَ الخلية إلى الطاقة فإن الخلية تُحَطِّمُ الرابِطَةَ العالية الطاقة الموجودة في جُزَيء ATP وتُحولها إلى أدينوزين ثنائي الفوسفات (ADP Adenosine DiPhosphate). تُطلِقُ هذه العمليةُ الطاقةَ التي تستطيع الخلية استعمالها لبَدءِ تَفاعلٍ كيميائي أو عمليةٍ فيزيائية مثل كل خطوة من الخطوات التي يقوم بها مُحرّكٌ جُزَيئي.



يَنتَهي معظمُ الغذاء الذي تَتَناوَلُهُ إلى معالَجَتِهِ في ميتوكوندريات خلاياكَ التي تُحوّل الطاقة الكيميائية الموجودة في الغذاء لصُنعِ كمياتٍ مذهِلة من مادة ATP. من المدهِش أن الميتوكوندريات الموجودة في تريليونات الخلايا التي تؤلّفُ جسمكَ تُنتِجُ بمجموعِها ما يُعادل وزنَ جسمكَ من مادة ATP كل يوم لكي تُزَوّدَ خلايا جسمكَ بالطاقة التي تحتاجها في القيام بجميع التفاعلات الكيميائية اللازمة! هل تَشعُرْ بالنَّبض في رسغكَ؟ وحرارة جلدكَ؟ وحركات الشَّهيق والزَّفير في صَدركَ؟ جميعُ هذه الحركات تُزَوّدُها جُزيئاتُ ATP بالطاقة التي تحتاج إليها، فالحياة تُحَرِّكُها جُزيئات ATP!

تحتاج جميع الكائنات الحيّة إلى تموينٍ بالطاقة مستمرٌ ويُعتَمَدُ عليه، وجميعها تَصنَعُ طاقَتَها بالعملية نفسها: السيطرة على تدفُّق البروتونات عَبرَ غِشاءٍ لتَصنيعِ جُزَيئات ATP. إذا كان هنالك ما يمكن اعتِباره "الشَّرارة الحَيوية" التي تحافِظ على الحياة فهي التَّدفُّق الضَّئيل للشحنات الكهربائية عَبرَ غِشاء. ولكن لا يوجَدُ شيء غَيبِيٌّ في كل ذلك فهو عمليةٌ كهربائية معروفة ومفهومة. تفعل

البكتيريات هذا بضَخٍّ بروتونات عَبرَ غِشائها الخارجي، بينما تقومُ به الخلايا الحقيقية النواة الأكثر تعقيدًا داخل حُجَيرَةٍ مُتخَصِّصَة هي الميتوكوندريا.

جميع هذه المستويات المختلفة من التَّنظيم المَكاني داخل الخلية، من المَواضِع المُتناهية في الصِّغَر داخل كل إنزيم، إلى النّواة الأكبر بكثير التي تَضمُّ الصّبغيات... كلها تَدفَعُ نحو طريقةٍ جديدة في التفكير بشأن الخلية. عندما نتأمَّلُ الصورَ الجميلةَ الدقيقة التفاصيل التي تُنتِجها الميكروسكوبات القوية هذه الأيام، نحن نَنظُرُ إلى شبَكَةٍ معقَّدة دائمة التغيّر من البيئات الكيميائية الميكروسكوبية المُرتَّبة والمُترابِطَة. هذه الصورة للخلية تَبتَعِد تمامًا عن صورة الخلايا التي تُشبِهُ قِطَعَ لُعبة الليغو Lego التي تَتراكَب مع بعضها بعضًا مثل حِجارة بِناء لتشكّل أنسجَةً وأعضاء أكثر تعقيدًا في النباتات والحيوانات. تَبدو كلّ خليّة الآن عالَمًا حيًّا قائمًا بذاته كاملًا ومتقدِّمًا في حَدِّ ذاتِه.

منذ أن بَدَأ لافوازييه بالتساؤل عن كيفية حدوث التَّخَمر الكحولي منذ أكثر من قَرنَين، توصَّلَ علماءُ الأحياء تدريجيًا إلى إدراكِ أنّ أعقَدَ عمليات الخلايا والكائنات الكثيرة الخلايا يمكن فَهمُها وِفقَ مبادئ الكيمياء والفيزياء. كانت هذه الطريقة في التفكير مهمّة جدًا بالنسبة لي ولزملائي في المختبر لكي نفهَمَ كيف يتم التَّحكّم بدَورة الخلية. اكتَشَفنا المُوَرِّثَة cdc2 كعامل يتحكَّم بدَورة الخلية، ولكننا أرَدنا بَعدَ ذلك أن نَعرفَ ماذا تفعلُهُ هذه المُوَرِّثَة بالضبط. ما هي العمليات الكيميائية أو الفيزيائية التي يقوم بها البروتين الذي تُوَجِّهُ صُنعَهُ المُوَرِّثَة cdc2 على وَجهِ التحديد؟

لكي نَعرفَ ذلك احتَجنا إلى التَّحول مِنْ عالَم الوراثة المُجَرَّد إلى عالَم الكيمياء في الخلية الأكثر واقعيةً وآلية. تَميلُ الكيمياء الحيوية إلى اتخاذ موقفٍ أكثر اختزالًا وتَصِفُ العمليات الكيميائية بتفاصيل كثيرة، بينما يتَّخِذُ عِلم الوراثة موقِفًا أكثر شمولية ويَنظُر إلى سلوكِ الأنظمة الحيَّة ككل. أظهَرتْ دراستُنا في عِلم الوراثة وبيولوجيا الخلية أن المُوَرِّثَة cdc2 كانت عاملًا متَحكِّمًا مهمًّا في دَورة الخلية ولكننا احتَجنا إلى الكيمياء الحيوية لكي نُظهِرَ كيف يَعملُ البروتين الذي تُوَجِّهُ صُنعَهُ المُوَرِّثَةُ cdc2 على مستوى الجُزَيئات. يقدّمُ كلا المَنهَجَين أنواعًا مختلفة من التفسيرات، وعندما يتَّفِقان مع بعضهما بعضًا فذلك يَمنَحكَ الثقة بأنكَ تسيرُ على الطريق الصحيح.

اتَّضَحَ أن البروتين الذي تُوَجِّهُ صُنعَهُ المُوَرِّثَةُ cdc2 هو إنزيمٌ يسمى بروتين كيناز Protein Kinase وهذا النوع من الإنزيمات يُحَفِّزُ تفاعلًا يُسمَّى الفَسفَرَة *Phosphorylation* الذي يُضيفُ جُزَيئًا صغيرًا من الفوسفور له شحنَة كهربائية سالبِة قوية إلى بروتينات أخرى. لكي يَعملَ بروتين

المُوَرِّثَة cdc2 بهذه الطريقة الإنزيمية يجب أن يَرتَبطَ أولًا ببروتينٍ آخر يُنَشِّطُهُ اسمُهُ سايكلين Cyclin فيؤلِّفَان معًا مُرَكَّبًا بروتينيًا نشيطًا اسمه Cyclin Dependent Kinase (CDK). اكتَشَفَ السيكلين وأَطلَقَ عليه هذا الاسم صديقي تيم هنت Tim Hunt لأنه بروتينٌ "يتحرك" جيئةً وذهابًا في المستوى أثناء دَورة الخلية، وهذه التَّغيرات هي جزءٌ من آليةٍ تَستخدِمها الخلية لضَمان أن مُركَّبَ البروتين CDK "يُفتَح" و"يُغلَق" في الوقت المناسب. وبالمناسبة فإن اسم "سايكلين" أفضَل بكثيرٍ من اسم cdc2!

عندما يُفَسفِرُ المركَّبُ النشيط CDK بروتيناتٍ أخرى، فإن جُزَيء الفوسفور المَشحون سالبًا الذي تُضيفُهُ يُغَيِّرُ الشَّكلَ والصِّفات الكيميائية لتلك البروتينات، مما يؤدي إلى تَغيير عَملها، فيَستطيع مثلًا تَنشيطَ إنزيماتٍ أخرى، مثلما يَحدُثُ عند إضافة السيكلين إلى بروتين cdc2 ليَجعله مُركَّبَ CDK النشيط. تستطيع بروتيناتٌ مثل CDK فَسفَرَةَ بروتيناتٍ كثيرة أخرى بشكلٍ سريعٍ في الوقت نفسه، ولذلك تُستَخدَمُ هذه الإنزيمات مثل مفاتيحِ فَتحٍ وإغلاقٍ في الخلايا، وهذا ما يَحدُثُ في دَورة الخلية أثناء عمليات نَسخِ الحمض النووي DNA في المرحلة الأولى من دَورة الخلية، ثم في فَصلِ الصّبغيات المُستَنسَخَة خلال الانقِسام المتَساوي في المرحلة المتأخرة من دَورة الخلية. تحتاج هذه العمليات إلى عَملٍ مُتناسِق لإنزيماتٍ كثيرة مختلفة. يستطيع بروتين CDK أن يتحكَّم بعملياتٍ خَلَوية معقَّدة عن طريق فَسفَرَةِ أعدادٍ كبيرة من هذه البروتينات المختلفة جميعها في الوقت نفسه. وهكذا فإن فَهمَ فَسفَرة البروتينات مفتاحٌ لفَهمِ التَّحكم بدَورة الخلية.

لا أستطيع التعبيرَ عن مَدى ارتياحي بكَشفِ كل هذه الأمور ورؤيةِ كيف تُحَقِّقُ المُوَرِّثَة cdc2 تأثيرَها الكبير وتَحَكُّمَها بدَورة الخلية. لقد شَعرتُ فعلًا بأنها لحظةٌ من لحظاتِ "وَجَدتُها" النادرة. انتَقلَ برنامجُ الأبحاث في مختبري مِنْ تمييز مُوَرِّثاتٍ في الخَميرة تُسيطِر على دَورة الخلية وتكاثرها، مثل المُوَرِّثَة cdc2، إلى إظهار أن هذا التَّحكم هو نفسُه في جميع حقيقيات النواة بدءًا من الخَميرة وانتهاءً بالإنسان، ثم في النهاية إلى كَشفِ العملية الجُزَيئية التي تَعمَل المُوَرِّثَةُ بواسِطَتِها. ولكن ذلك احتاجَ إلى زمنٍ طويل، حوالي خمس عشرة سنة، وتَعاون حوالي عَشرة زملاء يعملون معًا في مختبر أبحاثي. وكما هي الحالة عادةً في البحث العلمي فقد ارتَكَزَ أيضًا إلى مساهَماتٍ من مختبرات أخرى كثيرة حول العالَم تَعملُ على دراسة دَورة الخلية في طَيفٍ غريبٍ من الكائنات الحيّة شَمَلَ نجمةَ البحر وقُنفُذَ البحر وذُبابَةَ الفاكهة والضفادع والفئران والإنسان.

تَنشَأُ الحياةُ أساسًا من قواعد بسيطة نسبيًا معروفة جيدًا عن التَّجاذب والتَّنافر الكيميائي وبِناءِ أو تَحطيمِ الرَّوابط الجُزَيئية. وبطريقةٍ ما، تَجري هذه العملياتُ الأساسية كلها ضِمنَ مقياسٍ مُتَناهي في الصِّغَر وتَتضَافَرُ لتَنشَأَ بكتيريات تستطيع السباحة، وقَنافِذَ تَنمو على الصخور، وزهورًا نُربّيها في حدائِقِنا، وفراشات تَطير، وأنتَ وأنا ممَّن يَستَطيعون الكتابة والقراءة.

يَسودُ الاعتقاد والتفكير عن الحياة الآن بأنّ الخلايا والكائنات الحيّة هي آلاتٌ كيميائية وفيزيائية معقَّدةٌ بشكلٍ مُذهِل ولكن يُمكن فَهمُه. يَستندُ علماءُ الأحياء هذه الأيام على هذه الرؤية في محاولة وَصفِ وتَصنيفِ جميع مُكَوّناتِ هذه الآلات الحيّة المدهِشة المعقَّدة. ولكي نحقِّق ذلك لدينا الآن إمكانيةَ استِخدام تَقنياتٍ قويةٍ تَسمحُ لنا بالدراسة العميقة للتَّعقيد الأقصَى في الخلايا الحيّة. نستطيعُ أَخذَ خَليةٍ أو مجموعةٍ من الخلايا وكَشفَ تَسلسل جميع جُزَيئات الحموض النووية DNA وRNA فيها، وأن نُمَيِّزَ ونَعدَّ آلاف الأنواع المختلفة من البروتينات الموجودة. كما نستطيع أن نَصِفَ بالتفصيل جميعَ الدّهون والسّكريات وغيرها من الجُزَيئات التي نَجِدها في الخلايا. تزيد هذه التقنيات قدرات حواسّنا كثيرًا وتَمنَحنا رؤيةً جديدة شاملة لمُكَوِّنات الخلايا غير المَرئية والمتغيّرة باستمرار.

فَتْحُ هذه الآفاق الجديدة في الخلايا يَخلُقُ تَحَدّياتٍ جديدة أيضًا. وكما صاغَها سيدني برينر: "نحن نَغرَقُ في البيانات ولكننا نتَعَطَّشُ للمَعرفة". كان هَمُّهُ هو أنَّ كثيرًا من علماء الأحياء يقضي وقتًا طويلًا في تَسجيل ووَصفِ تفاصيل كيمياء الحياة دون أن يِعرفوا دائمًا ما الذي تَعنيه بالضبط، وإن فَهمَ كيفية تعامل الكائنات الحيَّة مع المعلومات ضروريٌّ لتَحويل كل هذه البيانات إلى مَعرفة مفيدة.

وهذه هي الفكرة المهمّة الخامسة في عِلم الأحياء والتي سنُناقِشُها فيما يلي.

5 - الحياة معلومات

العمل المتكامِل

ما الذي دَفَعَ الفراشةَ الصفراء للدخول إلى حديقةِ طفولَتي منذ تلك السّنين التي مَضَتْ؟ هل كانت جائعة؟ أم كانت تَبحَثُ عن مكانٍ تَضَعُ فيه بيوضَها؟ أو ربما كان يطاردها عصفور؟ أم لعلها كانت تَستجيبُ فقط لرغبةٍ داخلية لاستِكشاف عالَمِها؟ لا أعرفُ بالطبع ما هو سبب تَصرُّف الفراشة، ولكن ما يمكنني قولُه هو أنها كانت تتفاعل مع عالَمِها ثم تَتَصَرَّف، ولكي تَفعَل ذلك لا بد من أن تتعامَل مع معلومات.

المعلوماتُ مركزيةٌ في وجود الفراشة، بل هي مركزيةٌ في وجود الحياة كلها. لكي تعمل الكائنات الحيّة بكفاءة كنِظام معقَّد منظَّم، عليها أن تَجمَعَ معلوماتٍ باستمرار، وأن تتعامل دائمًا مع العالَم الخارجي الذي تعيشُ فيه، ومع الحالَة التي في داخلها. عندما تتغيَّر إحدى هاتَين الحالتَين، الخارجية أو الداخلية، يجب على الكائنات الحيّة أن تَجِدَ طُرُقًا لاكتشاف هذه التغيّرات وأن تَستَجيبَ لها لأن مستَقبلَها قد يكونُ في خَطَر.

كيف يَنطَبقُ ذلك على الفراشة؟ عندما كانت تَطيرُ في تَجوالها فإن حواسَّها تَبني صورةً مفصَّلة عن حديقتي. كانت عيونُها تتحسَّسُ الضوء، وقُرونُ استِشعارِها تُحلِّلُ عَيّناتٍ من جُزَيئاتِ المواد الكيميائية المختلفة فيما حولَها، وكانت أَشعارُها تُراقِبُ اهتزازات الهواء. كانت في كل ذلك تَجمَعُ معلوماتٍ كثيرة عن الحديقة التي كنتُ أجلسُ فيها. ثم وَضَعتْ كل هذه المعلومات المتنوعة مع بعضها بعضًا بهَدفِ تَحويلها إلى مَعرفة مفيدة تستطيع بِناءً عليها أن تَقومَ بالتَّصَرف. قد تكون تلك المعلوماتُ اكتشافُ ظِلِّ عصفور أو طِفلٍ فضولي، أو شَمُّ رائحة زَهرَة. يؤدي ذلك إلى نتيجة: تسلسلٌ منظَّمٌ لحركاتِ الأجنحة يَقودُ الفراشة إما لتَجَنُّبِ العصفور، أو للهبوط على زهرة للتّغذي.

كانت الفراشة تَجمَع كثيرًا من مَصادر المعلومات المختلفة وتَستخدِمها لتتَّخذ قراراتٍ ذات مَعنى ونتائج على مستَقبلِها.

تَرتبِطُ الطريقةُ الهادِفَة في تَصرُّفِ الكائنات الحيّة ارتباطًا وثيقًا باعتِمادها على المعلومات، فالمعلوماتُ التي كانت الفراشةُ تَجمَعُها تعني شيئًا، وكانت الفراشةُ تَستخدِمُها لكي تُقرِّرَ ما ستفعله في الخطوة التالية لكي تحقِّق هدَفًا محدَّدًا، وهذا يعني أنها كانت تتَصَرَّفُ بِقَصدٍ.

عِلمُ الأحياء هو فَرعُ من العِلم نتَحدثُ فيه كثيرًا عن القَصد والهَدف. وبالمقارَنة مع علوم الفيزياء فإننا لا نسأل عن هَدَفِ النهر، أو المُذَنَّب، أو مَوجَة الجاذبية، بينما من المعقول أن نَسألَ عن هَدف المُوَرِّثَة cdc2 في الخَميرة، أو قَصدَ الفراشة في طَيرانِها. جميعُ الكائناتُ الحيّة تُحافِظُ على نفسِها وتُنظِّم ذاتها وتَنمو وتَتكاثر، وهذه كلها تصرفاتٌ ذاتُ قَصدٍ وهَدَفٍ تَطوَّرَتْ لكي تزيد احتمالَ تحقيق الكائنات الحيّة لهدفها الأساسي وهو بقاؤها وبقاء نَسلِها.

السلوكُ الهادِف هو واحدٌ من الصِّفات التي تُعَرِّفُ الحياة، ولا يمكن أن تَتحقَّق هذه الصِّفَة إلا إذا عَمِلَت الأنظِمَةُ الحيَّةُ مع بعضها بعضًا ككلٍّ متكامل. أحَدُ الأشخاص الذين أدرَكوا هذه الصِّفة المميّزة للكائنات الحيّة هو الفيلسوف عمانوئيل كانت Emmanuel Kant في بداية القَرن التاسع عشر. ذَكَرَ عمانوئيل في كتابِه "نَقدُ العَقل" أن أجزاءَ الجسم الحَيِّ تُوجَدُ لمَصلَحةِ الكائنِ الحَيِّ بكامِلِه، وأنَّ الكائنَ الحَيَّ بكامِلِه يوجَدُ لمَصلَحَةِ أجزائِه. افتَرَضَ أن الكائنات الحيّة هي كياناتٌ مرتَّبَة ومِتماسِكَة وذاتية التَّنظيم وتَتحكَّم بمَصيرها.

فَكِّرْ بهذا على مستوى الخلية، فكلُّ خليةٍ تحتوي على كثير من التفاعلات الكيميائية المختلفة والعمليات الفيزيائية، وإذا سارَتْ جميعُ هذه العمليات المختلفة بشكلٍ عشوائي فَستؤولُ الأمور بسرعة نحو الانهيار والدَّمار، أو نحو التَّنافس مع بعضها بعضًا. ولا تتمَكَّن الخليةُ من فَرضِ النظام على التَّعقيد الكبير في عملياتها إلا بإدارة المعلومات وبالتالي تحقيق هدفِها النهائي في البقاء حيَّة والتكاثر.

لكي تَفهَم كيف يَحدُثُ ذلك تَذكَّرْ أنَّ الخلية هي آلةٌ كيميائية وفيزيائية تَتصَرَّفُ كَكلٍّ متكامِل. يمكنكَ فَهمَ كثيرٍ عن الخلية بدراسة مُكَوِّناتِها كلًا على حِدَة، ولكن لكي تَعملَ بشكلٍ سليم فإن جميعَ التفاعلات الكيميائية المتعدِّدة المختلفة التي تَعملُ داخل الخلية الحيّة يجب أن تَتصِّلَ مع بعضها بعضًا

وأن تتكامَلَ في عملها، وبهذه الطريقة عندما تتغيّر ظروفها الخارجية أو حالتها الداخلية، كأن يَنقُص السّكر في الخلية أو أن تُواجِه مادَّةً سامَّةً مثلًا، فإنها تستطيع أن تَشعُرَ بالتغيّر وتعَدِّلَ ما تقومُ به بحيث تُحافِظُ على النظام الكلّي عاملًا في أفضَل حالةٍ ممكِنة. ومثلما تَجمَعُ الفراشةُ معلوماتٍ عن العالَم وتَستخدِم هذه المعلومات لتَعديل سلوكِها، فإن الخلايا تُقَيِّمُ باستمرار الظروف الكيميائية والفيزيائية في داخلِها وفيما حولِها وتَستخدِمُ هذه المعلومات لتَعديلِ حالَتِها بالشكلِ المناسِب.

للتقدير بشكلٍ أفضَل ما يَعنيه أن تَستخدِمَ الخليةُ المعلومات لتَعديل نفسِها، ربما يُساعِدُ أن نُقَدِّرَ أولًا كيف يَتحقَّقُ ذلك في حالَةٍ أوضَح في الآلات التي صَمَّمها الإنسان. انظُرْ مَثلًا إلى جهاز حاكِم الطَّرد المَركَزي الذي اختَرعَهُ أولًا الباحِثُ الهولندي الشَّامل كريستيان هيغنز Christiaan Huygens لاستِخدامِه في الطَّواحين، ثم طَوَّرَهُ بنجاحٍ كبيرٍ المهندس الاسكتلندي والعالِم جيمس واط James Watt سنة 1788 واستَخدَمَهُ في المُحرّكِ البُخاري لكي يَضمَنَ أنَّ المُحَرّك سيَسيرُ بسرعةٍ ثابتة بدلًا مِن أنْ يتَسارَع وربما يتَحطَّم. يتألَّفُ هذا الجهاز من كُرَتَين مَعدَنيتَين تَدوران حَولَ مِحوَرٍ مَركزيّ يُدَوِّرُهُ المُحرِّكُ البُخاري نفسُه. عندما يُسرِعُ المحرك، تَدفَعُ قوى الطَّردِ المَركزي الكُرَتَين نحو الخارج والأعلى بحيث يكونُ لها تأثيرُ فَتحِ صمامٍ يُخرِجُ البُخار من اسطوانة المحرك فيُبطِءُ سَيرَهُ. وعندما يُبطِءُ المحركُ، يَنغَلِقُ الصمام فيَتَجَمّعُ البخار ويَسرِعُ المحرك من جديد بحيث يُحافِظ على السرعة المَرغوبة.

يمكننا فَهمُ جهاز تَحكُّمِ المهندس واط بشكلٍ أفضَل بتطبيقِه على المعلومات. يمكن اعتبار أن الكُرَتَين تعملان بقراءةِ المعلومات عن سرعة المحرك، فإذا زادَت السرعةُ عن المستوى المَطلوب، يَنشَطُ مفتاحٌ (مِثلَ عَملِ صمام البخار) يؤدي إلى تخفيضِ السرعة. يُشكِّلُ هذا جهازَ تحكُّمٍ معلوماتي تَستَخدِمُهُ الآلةُ لكي تُنظِّمَ نفسَها دون الحاجة إلى أي تَدَخُّلٍ من عامِلٍ بَشَري. بَنَى واط جهازًا ميكانيكيًا بسيطًا يَعمَلُ بطريقةٍ هادِفَة. هدَفُ الجهاز هو المحافِظة على عَمل المحرك البخاري بسرعة ثابتة، وقد نَجَحَ في تحقيق ذلك الهدف ببراعة.

تَستخدِمُ الخلايا الحية أنظِمةً مشابِهة تعمل وفقَ المبادئ نفسها على الرغم من كونِها غالبًا أكثر تعقيدًا بكثير وأنها عملياتٌ قابِلَةٌ للتَّعديل. تُقَدِّمُ مِثلُ هذه العمليات طريقةً فعَّالةً لتحقيق التوازن والاستقرار الداخليHomeostasis وهو عملياتٌ نشيطة تُحافِظُ على الظروف الداخلية المناسبة

للحياة. فمَثلًا، يَعملُ جِسمكَ بهذه الطريقة للمُحافَظة على الحرارة الثابتة، وعلى حجم السوائل الثابت في الجسم، وعلى استقرار سكّر الدم ضمن مَجالٍ طبيعي محدَّد.

تتغَلغَل إدارةُ المعلومات في جميع نواحي الحياة، ولتَوضيحِ ذلك لنَنظُر إلى مِثالَين لمُكَوِّناتٍ خَلَوية معقَّدة وعملياتٍ يمكن فَهمُها بشكلٍ أمثَل تحت عَدَسة المعلومات.

المثالُ الأول هو الحمض النووي DNA والطريقة التي يفسّر بها تركيبه الجُزَيئي عملية الوراثة. الحقيقة الأساسية عن هذا الحمض النووي هو أن كل مُوَرِّثَة هي تَسلسلٌ خَطيٌّ من المعلومات المَكتوبة بلغة DNA الرّباعية الأحرف. السلاسلُ الخَطِّية هي استراتيجيةٌ مألوفة وذات كفاءة عالية في تَخزين ونَقلِ المعلومات، فهي الاستراتيجية المُستخدَمة في الكلمات والجُمَل التي تقرأها أنتَ هنا الآن، وكذلك الاستراتيجيةُ التي يَستخدِمُها المُبَرمِجون الذين كَتَبوا الشيفرة لجهاز الكومبيوتر على طاولة مكتبكَ والهاتف المَحمول في جيبكَ.

تُخَزِّنُ هذه البرامج المختلفة المعلومات بطريقةٍ رَقَمِيَّة. واصطلاح "رَقَمِيَّة" هنا يعني أن المعلومات مُخَزَّنَة بتركيبات مختلفة لأرقام قليلة. تَستَخدِمُ اللغةُ الإنكليزية 26 رَقَمًا أساسيًا هي حروف أبجَديتها. وتَستخدِم أجهزةُ الكومبيوتر والهاتف المَحمول أنظِمةً من الأرقام "1" و"0". أما "أرقام" الحمض النووي DNA فهي قواعد النيوكليوتيدات الأربع. أحَدُ الميزات الكبيرة للأنظمة الرَّقَمِيَّة هي أنها يمكِنُ أنْ تُتَرجَمَ فورًا من نظامٍ بَرمَجَةٍ إلى نظامٍ آخر، وهذا ما تفعله الخلايا عندما تُتَرجِمُ برنامج الحمض النووي DNA إلى الحمض النووي RNA ثم إلى بروتين. وبِعَمَلِها هذا فإنها تُحَوِّلُ المعلومات الوراثية إلى عَملٍ فيزيائي بطريقة سَلِسَةٍ ومَرِنَةٍ لا يستطيع مجاراتِها أيّ نظامٍ هندسي اختَرَعَهُ الإنسان. وبينما يجب على أنظِمَة الكومبيوتر أن "تكتب" المعلومات على وسائط فيزيائية مختلفة لكي تُخَزِّنَها، فإن جُزَيء الحمض النووي DNA "هو" المعلومات، مما يَجعلُهُ طريقةً مُدمَجَةً لتخزين البيانات. لاحَظَ التقنيون ذلك وهم يُطَوِّرون أساليب لبَرمَجة معلوماتٍ في جُزَئيات DNA لتَخزينها بأفضَلِ طريقة ممكِنة وأكثرها استقرارًا وتوفيرًا للمَساحة.

الوظيفة الأخرى المهمّة للحمض النووي DNA هي قدرته على استِنساخ نفسِه بدقّة عالية، وهي أيضًا نتيجةٌ مباشرة لتَركِيبه الجُزَيئي، ومن الناحية المعلوماتية فإن التجاذب بين أزواج قواعده (A مع T، G مع C) تُعطِي طريقَةً لصُنعِ نسخٍ دقيقة موثوقة من المعلومات الموجودة في تسلسل بُنية جُزيء DNA. هذه القدرة على الاستِنساخ الذّاتي تفسِّر الاستقرار والثبات العميق في هذا

الحمض النووي. استَمرتْ بعضُ سلاسل المُوَرِّثات عَبرَ تَعاقُبِ انقساماتِ الخلايا على فترة طويلة جدًا من الزمن. هناك حاجةٌ لأجزاء كبيرة من الشيفرة الوراثية لِبناء المُكَوِّناتِ المختلفة في الخَلِيَّة، وهي متماثِلة بشكلٍ مدهِش مثل ريبوزومات جميع الكائنات الحيّة سواء في البكتيريات أو البكتيريات العتيقة أو الفطور أو النباتات أو الحيوانات. يعني هذا أن المعلومات الجَوهرية في هذه المُوَرِّثات قد تم الاحتفاظ بها دون تغييرٍ مُهِمٍّ على مَرِّ حوالي ثلاثة ملايين من السنين.

يفسِّرُ ذلك مَدى الأهمية العظيمة لبُنية اللولب الثنائي للحمض النووي، وعندما اكتَشَفَ كريك وواطسون ذلك التركيب فقد صَنَعا جِسرًا يَربِطُ بين الفَهمِ التَّصوري "الشَّامل" لعلماء الوراثة عن كيفية انتقال المعلومات اللازمة للحياة عَبرَ الأجيال، وبين الفَهمِ العملي لكيفية بِناء وعمل الخليّة على مستوى الجُزَيئات. وهذا يوضِّحُ لماذا لا يمكن إدراك مَنطقية كيمياء الحياة إلا عند دراستِها من الناحية المعلوماتية.

المثالُ الثاني لأهمية المعلومات في فَهمِ الحياة هو تنظيم المُوَرِّثات، مجموعةُ التفاعلات الكيميائية التي تقومُ بها الخليّة لكي "تُنَشِّطَ" أو "توقِفَ" عَمَلَ المُوَرِّثات. يَمنَحُ ذلك طريقةً للخلايا لكي تَستخدِمَ أجزاء مُعيَّنَة من المجموعة الكاملة للمعلومات الوراثية فيها، وهي الأجزاء التي تحتاجها فعليًا في أية لحظة من الزمن. تَظهَرُ الأهمية الحَرِجَة لقُدرة الخلايا على فِعلِ هذا التنظيم في مراحِل تَطَوُّرِ الجَنين من مجموعةِ خلايا عَديمة الشَّكل إلى الكائن الإنساني التام. إذ أنّ خلايا كُليَتَكَ وجلدكَ ودماغكَ... كلها تحتوي على المجموعة الكاملة من المعلومات الوراثية نفسها في 22000 مُوَرِّثَة، ولكنّ تنظيم عَمَلِ المُوَرّثات يعني أن المُوَرّثات اللازمة لصُنعِ الكُليَة هي التي تم "تَنشيطُها" في خلايا الجَنين التي ستَصنَعُ الكُليَة، بينما "أُوقِفَ" فيها عَمَلُ المُوَرِّثات التي تستطيع صُنعَ الجلد أو الدماغ، وهكذا. أي أنَّ كلَّ عضو من أعضاء جسمكَ يختلفُ عن بقية الأعضاء لأن خلاياه تَستخدِمُ مجموعاتٍ مختلفة تمامًا من المُوَرِّثات. وفي الواقع، يُعتَقَد بأن حوالي 4000 مُوَرِّثَة، أو خُمسَ عدد المُوَرِّثات الكلي، "يُنَشَّطُ" ويُستَخدَمُ في مختلف أنواع خلايا جسمكَ لتَدعَمَ القيامَ بالعمليات المختلفة اللازمة لحياتها، بينما لا تُستَخدَمُ بقية المُوَرِّثات إلا نادرًا وحَسبَ الحاجة، إما لأنها تقومُ بأعمال متخصِّصة لا حاجَة لها سوى في بعض أنواع الخلايا، أو لأنها تَلزَم في أوقات محدَّدة فقط.

يَعني تَنظيمُ المُوَرّثات أيضًا أن مجموعةً محدَّدة تمامًا من المُوَرّثات يمكن استِخدامُها دائمًا لصُنعِ كائناتٍ مختلفةٍ جِدًا في مراحل مختلفة من حياتها. كلَّ فراشةٍ صفراء رائعة الدِّقة والتعقيد تَبدأ

أولًا بِشَكلٍ أقلَّ إثارة للإعجاب هو اليَرَقَةُ الخضراء. يتم التّحول المُبهِر مِن شَكلٍ إلى آخر بتَنشيطِ أجزاء مختلفة من مجموعة المعلومات الوراثية ذاتِها الموجودة في المادة الوراثية نفسها التي تُستخدَمُ في أوقات وطُرُق مختلفة. إلا أن تنظيم المُوَرّثات ليس مهمًّا فقط عندما تكون الكائنات الحيّة في مراحل النمو والتطور، بل هو الطريقةُ الأساسية كذلك التي تقومُ بها كافة الخلايا في تعديلِ عملها وتركيبها لكي تَبقى حَيَّةً وتتأقلَم عندما تتغيّر بيئتُها. فمثَلًا إذا واجَهتْ بكتيريا مصدرًا جديدًا للسّكر، فإنها تقوم بسرعة بتَنشيطِ المُوَرِّثاتِ التي تحتاجها لهَضم السّكر الجديد. أو بكلمةٍ أخرى، تحتوي البكتيريا على نظامِ تنظيمٍ ذاتي يَنتَقي تلقائيًا المعلومات الوراثية المحدَّدة التي تحتاجُ إليها لتَحسين فُرصَتها في البقاء والتكاثر.

اكتَشفَ علماءُ الكيمياء الحيوية كثيرًا من العمليات الأساسية المستَخدَمة لتحقيق هذه الأعمال الفذَّة في تنظيم المُوَرّثات. هناك بروتيناتٌ تؤدي عَمَلَ "مُثَبِّطاتٍ" تُوقِفُ نشاطَ المُوَرّثات، أو "مُنَشِّطاتٍ" تُحَفِّزُ عملَها. تقومُ بهذه الأعمال عن طريق الارتباط إلى تسلسلٍ مُعيَّنٍ في جُزيء الحمض النووي DNA قَربَ المُوَرِّثَة التي يُرادُ تَنظيمُ عَمَلِها ويَجعَلها إما أكثرَ أو أقلَّ قُدرَةً على صُنعِ الحمض النووي الناقل RNA الضروري لنَقلِ المعلومات الوراثية إلى الريبوزومات التي تَصنَعُ البروتينات.

من الضروري معرفة كيف يتمّ ذلك كيميائيًا، ولكن بالإضافة إلى ضرورة التساؤل عن كيفية تنظيم عَمَل المُوَرّثات، نحتاجُ أيضًا إلى معرفة أيّ منها يتمَ تَنشيطُها أو تَثبيطُها، ولماذا؟ قد تَقودُنا الإجابةُ على هذه التساؤلات إلى مستويات جديدة من الفَهم، وقد تَبدأ بإخبارنا عن كيفية استِخدام المعلومات المُخَزَّنة في المادة الوراثية لخَليةِ بُويضَةٍ مُلَقَّحَةٍ واحِدةٍ عند الإنسان لتنفيذ أوامر تؤدي إلى تَشكيل مئاتِ الأنواع من الخلايا المختلفةِ الاختصاصات الموجودةِ في جسم إنسانٍ كامل. كيف يَستطيعُ دَواءٌ جديدٌ للقلب أن يُنَشِّطَ مُوَرِّثاتٍ أو يُثَبِّطَها لكي يُصَحِّحَ سلوك خلايا عضلة القلب. كيف نَستطيعُ إعادَةَ هَندَسة مُوَرّثاتِ بكتيريات لكي تَصنَعَ مُضادًا حيويًا جديدًا، بل وأكثر من ذلك في تقنيات الهندسة الوراثية. عندما نبدأ بالبحث في تنظيم عمل المُوَرّثات بهذه الطريقة يتَّضِحُ أن المفاهيمَ التي تَستَند إلى إدارةِ المعلومات ضروريةٌ لفَهم كيف تَعمَلُ الحياة.

ظهَرتْ هذه الطريقةُ الفعّالة في التفكير من دراساتٍ قامَ بها جاك مونو Jacques Monod وزميله فرانسوا جاكوب François Jacob وحصَلا على جائزة نوبل بفَضل تلك الدراسات. عَرفا

أنّ البكتيريات القولونية *E. coli* التي دَرسَاها تَعيشُ على نوعٍ أو آخر من السّكر، ويَحتاج استقلابُ كلّ نَوعٍ من نَوعَي السّكر إلى إنزيماتٍ تُوَجِّهُ صُنعَها مُوَرِّثاتٌ مختلفة. كان السؤال: كيف تُقَرِّرُ البكتيريات الانتقالَ بين هذَين النَّوعَين المُختَلفَين من السّكر؟

صَمَّمَ العالمان سلسلةً ذكيةً من التجارب الوراثية التي أظهَرت المنطقَ وراء هذا المِثال المحدَّد من تنظيم عمل المُوَرِّثات. أثبَتوا أنه عندما تتَغذّى البكتيريات على نوعٍ معيَّن من السّكر فإن بروتينًا محدَّدًا يوقِفُ عملَ المُوَرِّثَة الرئيسية اللازمة للتغذية على السّكر الآخَر، ولكن عندما يتوفَّر السّكر الآخَر فإن البكتيريات تتحَول بسرعة وتُنَشِّط المُوَرِّثات اللازمة لاستقلابه. مفتاحُ ذلك التَّحول هو السّكر الثاني نفسه لأنه يَرتَبط بالبروتين المُثبِّط ويوقِفُهُ عن القيام بعمله مما يَسمَحُ للمُوَرِّثَةِ المثبَّطَةِ في القيام بعَملها. هذه طريقةٌ اقتصادية ودقيقة لتحقيق سلوكٍ مَقصود، وقد صَمَّمَ التطور طريقةً لكي تَشعر البكتيريات بوجود المَصدر الثاني للطاقة واستِخدام هذه المَعلومة لتَعديل تفاعلاتها الكيميائية الداخلية بشكلٍ موافِقٍ صحيح.

مما يُثيرُ الإعجاب أن مونو وجاكوب قد نجَحا في القيام بذلك في زمنٍ لم يتمكَّن فيه أحدٌ من تَنقِيَةِ المُوَرِّثات والبروتينات المَعيَّنة التي تَشترِكُ بهذه العملية. وقد حَلاّ هذه المشكلة بمراقبة هذه البكتيريات من خلال منظور المعلومات، أي أنهما لم يحتاجا لمَعرفة الجزيئات الكيميائية والمُكَوِّنات المُحدَّدة التي تَشترِك بهذه العملية الخَلَوية قَيدَ البحث. وبَدلًا عن ذلك فقد تعامَلا مع المسألة بطريقةٍ تَستَند على الوراثة وعلى طَفراتٍ في المُوَرِّثات المُشارِكة في العملية والتعامل مع المُوَرِّثات كأجزاء معلومات مُجَرَّدة تحكَّمَتْ في التعبير عن الوراثة.

نَشَرَ جاكوب كتابًا اسمه "منطق الحياة"، وكتَبَ مونو "الصدفة والضرورة". غطَّى كلاهما قضايا مشابِهة لما أناقِشُهُ في هذا الكتاب، وتأثَّرتُ بهما كثيرًا. لم أتَعرَّف على مونو شخصيًا، ولكنني التقيتُ بجاكوب عدة مرات. دعاني إلى غداءٍ في باريس في آخر مرة شاهدتُه فيها. أرادَ أن يتحدَّثَ عن حياتِه وأن نناقش أفكارًا: كيف نُعَرِّف الحياة، النتائج الفلسفية للتطور والمساهَمات المُتَبايِنَة للعلماء الفرنسيين والأنكلوساكسون في تاريخ عِلم الأحياء. كان يتَمَلمَل باستمرار بسبب جروحِ حربٍ قديمة، وكان المثقف الفرنسي الأصيل والقارئ النّهم أدَبيًا وسياسيًا. كان لقاءً مهمًا لن أنسَاه.

كان جاكوب ومونو يعمَلان في فترةٍ كانت فيها فِكرَةُ انتقالِ المعلومات من تسلسل المُوَرِّثات إلى البروتينات إلى وظائف الخلية وكيفية إدارة وتنظيم هذا الانتقال مازالت فكرةً ناشِئة. وَجَّهَ

تفكيري هذا المَنهجُ الذي يَدورُ حولَ المعلومات أيضًا، وعندما بدأتُ مهمّتي في البحثِ العلمي أردتُ أن أعرفَ كيف تَعرِفُ الخليَّةُ حالَتَها الذاتية وتُنَظِّمُ تفاعلاتها الكيميائية الداخلية للسيطَرة على دَورة الخلية. لم أشَأ أن أصِفَ فقط ما يَحدُث أثناء دَورة الخلية، بل أردتُ أن أفهَم ما الذي يتحكّم بدَورة الخلية. وهذا يعني أنني كنتُ أعودُ دائمًا للتفكير بدَورة الخلية من حيث المعلومات واعتبار أن الخلية ليست فقط آلةً كيميائية بل كآلة منطقية وحاسوبية مثلما اعتَبرها جاكوب ومونو، أي أنها تَعتَمدُ في وجودِها وفي مستقبلِها على قُدرتِها في معالَجة وإدارة المعلومات.

طَوَّرَ علماءُ الأحياء في العقود الأخيرة أدوات قوية واستَثمَروا جُهدًا كبيرًا في التَّعرف على مُكَوِّنات الخلية المُتَنوعة وفي عَدِّها. فمَثلًا، بَذَلَ مختبري عمَلًا كثيرًا في كَشفِ تسلسل كل المادة الوراثية للخَميرة الانشطارية. قُمنا بذلك مع بارت بارل Bart Barrell الذي كان قد عَمِلَ مع فريد سانغر Fred Sanger الذي اختَرَعَ في السبعينيات أولَ طريقةٍ عملية معتَمدة في تحليل تسلسل الحمض النووي DNA. التقيتُ مع سانغر عدة مرات أثناء هذا المشروع، على الرغم من أنه كان متقاعدًا رسميًا آنذاك. كان رجلًا مهذّبًا هادئًا يحبُّ تربيةَ الزهور، وكان كريمًا دائمًا في مَنحِ وقتِه مثل كثير من أنجَحِ العلماء الذين التقيتُ بهم، يتحدثُ ويُشجعُ العلماء الأصغَر. عندما جاءَ إلى مختبر بارت كان مَظهَرُهُ مثل بستانيٍّ ضَلَّ طريقَهُ، إلا أنه كان بالطبع بُستانيًا حازَ على جائزة نوبل مرتَين!

نظَّمتُ مع بارت عمَلًا مشترَكًا ضَمَّ حوالي عَشرة مختبرات في أوروبا لقراءة حوالي 14 مليون حرف من حروف الحمض النووي DNA في المادة الوراثية للخميرة الانشطارية. استغرَقَ هذا جهود حوالي مئة شخص ومدة ثلاث سنوات لاستكماله، وكانت حسبما أذكُر الكائنَ الثالثَ من حقيقيات النواة الذي عُرِفَ تسلسله بشكلٍ كامل وصحيح. تمّ ذلك سنة 2000. والآن يمكن كَشفُ تسلسل هذه المادة الوراثية ذاتِها بعملٍ يقومُ به اثنان خلال يوم واحد! وهذا هو مقدار التَّقدم في كَشفِ تسلسل الحموض النووية خلال العَقدَين الأخيرَين.

تجميعُ مثل هذه البيانات مهمّ بالطبع، ولكن فقط كخطوة أولى نحو الهدف الأهمّ والأكثر صعوبة وهو فَهمُ كيف تعمل جميع هذه الأمور مع بعضها بعضًا. كان هذا الهدف في ذهني عندما فكرتُ أن معظم التقدم سيتَحَقَّقُ بدراسة الخلية وكأنها تتألف من سلسلةٍ من الوحدات المنفَردة التي تَعملُ مع بعضها بعضًا لإنجاز صِفات الحياة الأكثر تعقيدًا. استخدَمتُ كلمة "الوحدات" هنا لوصفِ مجموعةٍ من المُكَوِّنات التي تَعمل كوحدة لتقوم بوظيفة معالَجة معلومات معيّنة.

بهذا التعريف يمكن اعتبار جهاز التحكّم الذي استَخدَمَهُ واط في مُحرَّكِهِ البُخاري "وحدةً" تقوم بوظيفةٍ ذات هدفٍ واضِح محدَّد هو التَّحكم بسرعةِ المحرك، وآليةُ تنظيم عَمَلِ المُوَرِّثَة الذي اكتَشَفَهُ جاكوب ومونو لتَحكُّم البكتيريات باستِخدام السّكر هو مثالُ "وحدة" آخر. يعمل كل منهما من وجهةِ نظرٍ معلوماتية بطريقةٍ متماثلة وهما أمثلةٌ على وحدات معالَجة المعلومات التي تُسمى "حلقاتُ رُدودِ الفِعل السَّلبية Negative Feedback Loops". يمكن استِخدامُ هذه الوحدات للمحافِظة على حالَةٍ مستقرة، وهي تُطبَّقُ بشكلٍ واسعٍ في البيولوجيا، فهي تعمل مثلًا على المحافَظة على مستوى السّكر في دمكَ ضمن الحدود الطبيعية حتى بَعدَ أن تتناول الحلوى، إذ تَستطيعُ خلايا في غدّة البَنكرياس لديكَ أن تَكشفَ وجودَ زيادةٍ في سكّر الدم، وتَستجيبَ بإفراز هورمون الإنسولين في دمكَ. يُحَفِّزُ الإنسولين خلايا في كبدكَ وعضلاتكَ والنُّسُج الدّهنية عندكَ لكي تمتَصَّ السّكر من الدم وتُحوِّلُه وتُخَزِّنُه إما بشكلِ غليكوجين أو دهون، فيَنخَفض مستوى السّكر في الدم.

هناك نوعٌ آخر من الوحدات هي "حلقاتُ رُدودِ الفِعل الإيجابية Positive Feedback Loops" التي قد تشكّل مفاتيحَ لا تتغير، وإذا فُتِحَتْ فلا يمكن غَلقُها. تعملُ حَلَقَةُ رَدّ الفِعل الإيجابي بهذه الطريقة لتتحكّم بالطريقة التي تَنضُجُ فيها تفاحَةٌ مَثلًا، لكي تَنضُجَ التفاحة فهي تُنتِجُ غازًا يُسمى الإيثلين الذي يَعمل لتَسريع عمليةِ النضج ولزيادة انتاج غاز الإيثلين أيضًا، وتكون النتيجةُ أن التفاحة لا يمكن أن تَعودَ لتُصبِحَ أقلَّ نُضجًا، كما أنّ جاراتِها من التفاح قد تساعِد بعضها بعضًا لكي تَنضجَ أسرع.

عندما تَعملُ وحداتٌ مختلفة معًا فإنها تستطيع أن تشكّل نتائجَ أكثر تطورًا وتعقيدًا، فمثلًا هناك آليات تُنتِجُ مفاتيح قد تُفتَح أو تُغلَق بشكلٍ متعاكِس، أو أنها تَهتَزُّ وتَتذَبذَب بشكلٍ إيقاعي مستمر بين الفَتح والإغلاق. اكتَشفَ علماءُ الأحياء مثل هذه المُتَذَبذِباتOscillators التي تعمل على نشاط المُوَرِّثات والبروتينات، وهي تُستَخدَمُ لأغراض كثيرة مختلفة، مثل التفريق بين النهار والليل. تحتوي النباتاتُ على خلايا في أوراقها تَستخدِمُ شبكةً متذَبذِبة من المُوَرّثات والبروتينات لقياسِ مرور الوقت تَسمَحُ للنبات بِتوقُّع بَدءِ يومٍ جديد فتُنشّط المُوَرّثات اللازمة للبِناء الضوئي قُبيل استِقبالها للضوء. هناك مُتذَبذِباتٌ أخرى تَنبُضُ بين النشاط والتوقف نتيجةَ اتصالٍ بين خلايا. أحَدُ الأمثِلَة على ذلك هو القلب الذي يَنبُضُ في صَدركَ الآن. ومثالٌ آخر هو الشّبكاتُ المُتذَبذِبة في الخلايا العَصَبية التي تَنشَطُ في النُّخاع الشّوكي وتُنَبِّهُ أنماطًا معيَّنة من الانقباض والانبساط المتكرر

في عضلات الساقَين تَسمحُ لكَ بالمَشي بسرعة ثابتة. تَحدُثُ كل هذه الأعمال دون أن تحتاجَ منكَ لأيّ تفكيرٍ واعٍ جاد.

ترتبط وحدات أخرى مع بعضها بعضًا في الكائنات الحيّة لكي تُنتِجَ تصرفاتٍ أكثر تعقيدًا. يمكن تشبيه ذلك بالطريقة التي تعمل فيها وظائف متعدِّدة ومختلفة في الهاتف الذّكي، فوظائفُ الهاتف المختلفة، مثل إمكانية إجراء مكالمات، أو التواصل مع الانترنت، أو أخذ صورة، أو الاستماع إلى الموسيقى، أو إرسال بريد الكتروني... يمكن أن تُعتَبر مثلَ الوحدات التي تعمل في الخلية. يَجِبُ على المهندس الذي يُصَمِّمُ هاتِفًا ذكيًا أن يتأكَّد من أن جميع هذه الوحدات المختلفة تعمل مع بعضها بعضًا بحيث يَستطيعُ الهاتفُ أداءَ كل وظيفة يجب للقيام بها. ولكي يتحقَّق هذا يقوم المهندسون بصُنعِ خرائطَ منطقية تُظهِر كيف تسير المعلومات بين الوحدات المختلفة. أهمّ مقدرةٍ للبَدء بتَصميمِ هاتفٍ ذكيٍّ جديد على مستوى الوحدات هي أن يتأكَّد المهندسون من أنَّ خططهم تُحقِّقُ مَعنى وظيفي عملي دون أن تضيعَ في تفاصيل الوحدات المنفَصِلة. وبهذا لا يحتاجون في البداية إلى التركيز كثيرًا على الأعدَاد الهائلة من الترانزيستورات المنفَصِلة والمُكثِّفات والأعداد التي لا تُحصَى من المُكوِّنات الإلكترونية التي تُشَكِّلُ كُلَّ هاتف.

تَبنِّي مِثلَ هذا المَنهج يُمثِّلُ أسلوبًا قويًا لفَهم الخلايا. إذا استَطَعنا مَعرفةَ وفَهمَ الوحدات المختلفة في الخلية وعَرفنا كيف تَربطها الخلايا ببعضها بعضًا في إدارة المعلومات، فلن يكون حتميًا علينا أن نَعرفَ جميع التفاصيل الجُزَيئية الضئيلة لعَمَلِ كُلِّ وِحدَة. يجب أن يكون الطموح العام هو كَشفُ المَعنى وليس تصنيفُ التّعقيد. أستَطيعُ مَثلًا أن أعطيكَ لائحةً تضمُّ جميعَ الكلمات المختلفة المَطبوعة في هذا الكتاب، مع ذِكرِ تَكرار كل واحدة منها، إلا أن هذه اللائحة ستكون مِثلَ الحصول على لائحة الأجزاء دون أن يَتوفّر كُتَيِّبُ التعليمات. قد تَمنحُ اللائحةُ إحساسًا بمَدى تَعقيد النَّص، إلا أن مَعناها سيَضيع. لكي تَفهَم المَعنى، يجب عليك أن تقرأ الكلمات بالتسلسل الصحيح، وأن يتكَون لديكَ فَهمٌ عن المعلومات التي تَنقلها على مستوى أعلى، بشكل جُمَلٍ ومَقاطِع وفُصول في الكتاب. تَعملُ هذه الأمور مع بعضها بعضًا لتروي قصصًا وتقارير وتَربط أفكارًا وتُعطي تفسيرات. يَنطَبِقُ ذلك بالطريقة ذاتها عندما يُصَنِّفُ عالِمُ الأحياء جميع المُوَرِّثات والبروتينات والدّهون في خلية. وهذه خطوةُ انطلاقٍ مهمَة، ولكن ما نُريدُه حقًا هو فَهمُ كيف تَعملُ هذه الأجزاء مع بعضها بعضًا لكي تُشكِّلَ الوحدات التي تحافِظ على حياة الخلية وتُمكِّنَها من التكاثر.

تساعد التشبيهات بين الالكترونيات وأجهزة الكومبيوتر كمِثال الهاتف الذكي الذي شَرحتُهُ الآن على فَهمِ عَملِ الخلايا والكائنات الحيّة، إلا أننا يجب أن نَستَخدِمَها بحَذرٍ لأن وحدات إدارة المعلومات التي تَستَخدِمها الكائناتُ الحيّة والدّاراتُ الإلكترونية التي يَصنَعُها الإنسان تختلفُ عن بعضها كثيرًا في بعض النواحي. حالَةُ أجهزةِ الكومبيوتر الرَّقَميَّة ثابتةٌ وغَير مَرِنَة، ولهذا تُسمى "الأجهزة الصَّلبة "Hardware". وبالمقارَنة، فإن "وَصلات" الخلايا والكائنات الحيّة لَيِّنَة وديناميكية لأنها تَستَنِدُ إلى مواد كيميائية حيوية يمكن أن تَمُرَّ عَبرَ الماء إلى الخلايا وتتحرك بين مُكَوِّناتِ الخَليَّة المختلفة وكذلك بين الخلايا. يمكن لهذه المُكوِّنات أن تشكّل روابطَ جديدة وتتَّخِذَ مواضِعَ مختلفة لتحقيق أهداف جديدة بشكلٍ أكثر حرية في الخَلية، أو بشكلٍ عَمَلي يمكنها أن تُعيدَ "توصيلات" النظام بكامله. سرعان ما ستَنهارُ تَشبيهاتُنا عن الأجهزة الصَّلبة والبرمجيات، وهذا هو السببُ الذي دَفَعَ عالِمَ الأحياء دنيس برايDennis Bray لوَضعِ الاصطلاح المُعَبِّر "الأجهزة الرَّطبة Wetware" لوَصفِ المادة المعلوماتية للحياة. تَصنَعُ الخلايا وَصلاتٍ بين مُكَوِّناتِها المختلفة في وَسَطٍ من الكيمياء الرَّطبة.

ينطَبقُ هذا أيضًا على الدماغ، وهو أعلى نموذجٍ للكومبيوتر البيولوجي وأكثرها تعقيدًا. تَنمو الخلايا العَصَبية أثناء حياتكَ وتُنَسِّقُ وتَصنَعُ وتُفَصِّلُ اتِّصالاتِها مع الخلايا العَصَبية الأخرى.

يحتاجُ أي نظامٍ معقَّد إلى وجود اتصالات فعّالة بين مُكَوِّناتِه المختلفة ومع الظروف الخارجية التي تُحيطُ به لكي يَعملَ ككلّ لتحقيق هَدَفٍ محدَّد. نسمي في عِلم الأحياء الوحدات التي تقومُ بهذه الاتصالات "مَسارات الإشارة Signalling Pathways"، ويُعتَبَرُ الإنسولين الذي ينظِّمُ سكّر الدم وغيره من الهورمونات في دَمِ الإنسان مِثالًا على مَسارات الإشارة. تَنقُلُ مَسارات الإشارة معلوماتٍ داخل الخلايا وبين الخلايا وبين الأعضاء وبين الكائنات وبين جماعاتٍ من الكائنات وحتى بين الأنواع المختلفة في أنظِمَةٍ بيئيةٍ كامِلة.

يمكن تَعديلُ الطريقة التي تَنقلُ فيها مَسارات الإشارة المعلومات لتَحقيق نتائج كثيرة مختلفة. تَستطيعُ أن تُرسِلَ إشاراتٍ تَفتَحُ أو تُغلِقُ مَسارَ نتيجةٍ معيَّنة ببساطة مثل مفتاحِ الضوء الكهربائي، ولكن الإشارات قد تعمل بأشكال أكثر خُفيَةً كذلك، ففي بعض الأحوال مثلًا قد تَفتَحُ إشارةٌ خفيفةٌ مسارَ نتيجةٍ معيّنة، بينما تَفتَحُ إشارةٌ أقوى مَسارًا آخر. بطريقةٍ مماثلة، قد تُثيرُ هَمسَةٌ انتباهَ جارِكَ القريب، بينما تَحتاجُ إلى صَرخَةٍ لكي تُخلِي غُرفةً في حالةٍ طارئة. تَستطيعُ الخلايا أيضًا أن تَستَغِلَّ

سلوكًا ديناميكيًا لمَسارِ إشارةٍ لكي تَنقلَ تيارًا أكبر من المعلومات. حتى لو أن الإشارة ذاتها يمكن أن تكون بشكلِ "إفتَح" أو "أَغلِق" يمكن نَقلُ معلوماتِ أكثر بتغيير الزمن الذي تَستَغرِقهُ كل حالَةٍ من هاتَين الحالتَين. يمكن تَشبيه ذلك بإشاراتِ مورس Morse Code. من خلال تغييراتٍ بسيطة في زَمَنِ وتَسلسُلِ نَبضَاتِ إشارةٍ، فإن "نقاط" و"شَرطَات" إشاراتِ مورس تَستطيعُ نَقلَ سِلسِلةٍ من المعلوماتِ المَليئة بالمعاني سواءً كانت تلك إشارة استغاثة SOS أو نَصَّ كتاب داروين عن أصلِ الأنواع. تستطيعُ مَسارات الإشارة البيولوجية التي تَعملُ بهذه الطريقة أن تَحمِلَ صفاتٍ غنية بالمعلومات تَنقُل مزيدًا من المعاني أكثر من سلسلة إشاراتٍ تَحملُ رسالة بسيطة مثل "نعم/لا" أو "تشغيل/إيقاف.

بالإضافة إلى نَقلِ إشاراتٍ عَبرَ المكان، تحتاج الخلايا إلى نَقلِها في الزمان. لتحقيق ذلك يجب على الأنظمة البيولوجية أن تتمكّن من حِفظ المعلومات، وهذا يعني أن الخلايا تَحمل معها طَبعاتٍ كيميائية لتجاربها التي مَضَتْ، وهو ما نتصَور أنها تعمل مثل الذكريات التي نَحمِلها في عقولنا. تَعمَل هذه الذكريات الخَلوية على مَدى واسِع من الانطباعات العابِرة لما حَدَثَ منذ لحظة مضَت، إلى الذكريات الثابتة بعيدة المَدى المَحفوظَة في الحمض النووي DNA. تَستَخدِمُ الخلايا المعلومات التاريخية قصيرة المَدى أثناء دَورة الخلية حين يتم "تذكّر" الأحداث التي حصَلَتْ باكرًا في الدَّورة وتُرسِل إشاراتها إلى أحداث ستأتي بَعدَها في دَورة الخلية. فمثلًا، إذا لم تتم عملية نَسخ الحمض النووي DNA أو إذا حَدَثَ خطأ فيها، يجب أن تُسجَّل هذه المعلومة وتُنقَل إلى العمليات التي تؤدي إلى انقسام الخلية. إذا لم تُنقَل هذه المعلومة فقد تُحاوِل الخَلية الإنقسام قَبلَ أن يتمّ نَسخ مادَّتها الوراثية الكاملة بشكلٍ صحيح، مما قد يؤدي إلى فقدان معلومات وراثية ومَوت الخَلية.

تَسمحُ عمليات تنظيم عمل المُوَرِّثات للخلايا بتَخزين معلومات على فتراتٍ أطول في الزمن. كان هذا مجال اهتمامٍ خاص لعالِم الأحياء البريطاني كونراد وادينغتون Conrad Waddington في منتصف القَرن العشرين. التقيتُ بوادينغتون في جامعة إدنبرة حين بدأتُ أبحاثي بَعدَ الدكتوراة سنة 1974. كان شخصيةً مُلفِتَةً للنَّظر باهتمامات واسعة في الفنون والشعر والسياسة اليسارية، إلا أنه اشتهر بصياغة اصطلاح "عِلم الوراثة اللاجينية *Epigenetics*". استُخدِمَ هذا الاصطلاح لوصف الطريقة التي تقوم بها الخلايا تدريجيًا للقيام بأدوار أكثر تخصّصًا خلال تطور الجَنين.

عندما يتَطلَّب نمو الجَنين من الخلايا القيام بهذه الأدوار، تتذكّر هذه المعلومات ونادرًا ما تغيَر مَسارها. وبهذا ما أن تَلتَزم خليةٌ بتكوين جزءٍ من الكُليَة، فستَظَلُّ جزءًا من الكُليَة.

يَرتكِزُ استِخدام معظم علماء الأحياء هذه الأيام لاصطلاح عِلم الوراثة اللاجينية على أفكار وادينغتون التي تَصِفُ مجموعةً من التفاعلات الكيميائية التي تقوم بها الخلايا لتَنشيط أو لتَثبيط مُوَرِّثاتٍ بشكل دائم. لا تغيّر هذه العمليات اللاجينية تَسلسل جُزَيء الحمض النووي DNA ذاتها، بل تعمل عادةً بإضافة "بطاقات أو علامات" إليه أو إلى البروتينات المرتَبطَة به. يشكّل ذلك أنماطًا من نشاط المُوَرِّثات قد تبقَى على مَدى حياة الخلية وربما عَبرَ كثيرٍ من انقساماتها، وبشكلٍ نادر أحيانًا قد تستمر من جِيل إلى جِيل حامِلَةً معلومات عن حياة كائنٍ حَيّ وتجاربه مباشرةً بشكلٍ كيميائي من الوالِدين إلى النَّسل التالي وعَبرَ أجيال بَعدَهما. يَعترِضُ بعض العلماء أن استمرار هذه الأنماط من التعبير عن المُوَرِّثات عَبرَ الأجيال يُمثِّلُ تحدّيًا كبيرًا لفكرة أن الوراثة تَستَند فقط إلى تسلسل الحمض النووي DNA والشيفرة في المُوَرِّثات. وعلى كل حال فإن الأدلة الحالية تُشير إلى أن الوراثة اللاجينية عَبرَ الأجيال تَحدثُ فقط في حالاتٍ قليلة ويبدو أنها نادرة جدًا عند الإنسان وغيره من الثدييات.

بالإضافة إلى تنظيم عمل المُوَرِّثات فإن إدارةَ المعلومات مهمّة للطُّرُق التي تُشكّل فيها الكائنات الحيّة هياكلَ منظَّمَة في المكان. انظُر مثلًا إلى فراشَتي الصفراء، إنها هيكلٌ معقّد بشكلٍ رائع: شَكلُ أجنِحَتِها يَسمحُ لها بالطيران، وهناك نقاطٌ وأورِدَةٌ موضَّعَةٌ في تلك الأجنحة بدقّة كبيرة، كما أن جميع الفراشات مَبنيةٌ بالخطَّة ذاتها: فمثلًا، كلّ منها لها رأسٌ وصَدرٌ وبَطنٌ وستة أَرجُل وقَرنان. تتشكّل جميع هذه الأجزاء وتنمو بتناسُبٍ ثابت مع بقية جِسمها يمكِن التَّنبؤ به. كيف نَشأَ كُلُّ هذا الهيكل الاستثنائي ثلاثيّ الأبعاد؟ كيف يَنبَثِقُ كلّه من بُوَيضَةٍ مُلَقَّحَةٍ واحِدة؟

تستطيع الخلايا أن تتَّخذَ طَيفًا من الهياكل والأشكال العالية الإتقان والتي تختلف تمامًا عن خلايا الفَلّين التي تُشبه العُلَبَ المنتظَمة التي وصَفَها روبرت هوك في القَرن السابع عشر والتي شاهدتُها في جذور البَصل عندما كنتُ طالبَ مدرسة، فهناك أشعارٌ تشبه أسنانَ المشط في خلايا الرئة، والتي تَدفَعُ حركاتُها المستمرة المخاطَ والالتهابات إلى خارج رئتكَ. هناك أيضًا خلايا تشبه المكعبات التي تعيشُ في عظامكَ وتَصنَعها، وخلايا عصبية تَصِلُ فروعها الطويلة إلى جميع أجزاء جسمكَ... وهناك داخل تلك الخلايا عُضَيَّاتٍ تنمو في مواضِع دقيقة وتغيّر مواضِعها مع تغيّر الخَلية.

كيف يَنشَأ كل هذا النظام المَكاني هو أحَدُ أسئلةِ التحدي الأصعَب في عِلم الأحياء. ستَعتَمد الإجابات المُقنِعة على فَهم سَير إشارة المعلومات في المكان والزمان. في الوقت الحالي لا نفَهم تمامًا تركيب الأشياء البيولوجية التي تتألف مباشرة من جزيئات، فالريبوزومات هي مِثال جيد على ذلك، لأن أشكال هذه الجُسَيمات الصغيرة تحدِّدها الروابط الكيميائية التي تتشكَّل بين مُكَوِّناتِها الجُزَيئية. يمكنكَ التفكير بهذه الجُسَيمات كأنها مَبنيةٌ بإضافةِ قِطَعٍ إلى بعضها بعضًا في أحجِيةٍ ثلاثية الأبعاد مثل لعبة الليغو Lego. وهذا يعني أن المعلومات اللازمة لتجميع هذه الجُسَيمات كامِنةٌ في شَكلِ مُكَوِّنات الريبوزومات نفسها من الحمض النووي RNA والبروتينات. وهذه الأشكال بدورها مَحكومة بدقّة عالية بالمعلومات الموجودة في المُوَرِّثات.

والأكثر صعوبة هو فَهم كيف تتألف الهياكلُ على مقاييسَ أكبر في أجسامٍ مِثلَ العُضَيَّات والخلايا والأعضاء والكائنات الحيّة التامة. لا يمكن أن تُفَسِّرَ التفاعلاتُ المباشرة بين الجُزَيئات والمُكَوِّنات كيف تتشكّل هذه الهياكل. يَرجِعُ هذا جُزئيًا إلى كَونِها أكبر حَجمًا، وأحيانًا أكبر بكثير من جُسَيماتٍ صغيرة كالريبوزومات، ولكن أيضًا لأنها تستطيع بِناءَ هياكل مثالية تامة في مجال واسع من الأحجام المختلفة حتى عندما تنمو الخلايا والأجسام أو تتقلَّص. لا يمكن أن يَحدُث ذلك ببساطة في التفاعلات الجُزَيئية الثابتة مِثلَ قِطَعِ الليغو. تأمَّلْ مَثلًا انقسامَ الخلية، فالخَليةُ لها هيكلٌ عام منظَّم، وعندما تنقسِم فإنها تُنتِجُ خَليَّتان حَجمُ كُلٍّ منها نصف حجم الخلية الأم تقريبًا، ومع ذلك ففي كلٍّ منها جميع المُكَوِّنات الموجودة في الخلية الأم.

تُشاهَدُ ظاهرةٌ مماثلة في تطور الجَنين، مِثلَ جِنين قُنفُذ البحر. إذ تَنقسِم بويضِةٌ ملقَّحَةٌ لقُنفُذ البحر مرات عديدة وتُنتِجُ كائنًا صغيرًا رائعًا جميلًا. بعد الانقسام الأول للبويضَة الملقَّحَة تَنشَأ خليَّتان، وإذا تم فَصلُهُما عن بعضهما بعضًا فإن كل واحدة منهما ستَتطور إلى قُنفُذِ بَحرٍ تامّ التكوين، ولكن المدهِش أن كلًا منهما سيكون حَجمُهُ نصف حَجمِ قُنفُذِ البحر الوليد الطبيعي. هذا التنظيم الذاتي في الحَجم والشكل مدهِش وقد حِيَّرَ العلماء فترةَ أكثر من قَرن.

ولكن عند التفكير بالمعلومات، بَدأ علماءُ البيولوجيا بإدراك كيفية حدوث هذه الأمور. إحدى الطُّرُق التي يُوَلِّدُ بها الجَنينُ المتطور المعلومات التي يحتاجها للتَّحول من خليةٍ واحدة أو مجموعة من الخلايا المتماثِلة إلى هيكلٍ دقيق التكوين هي عَمَلُ تدرُّجاتٍ كيميائية. إذا وضَعتَ نقطةً من الحِبر في كأسٍ من الماء فستَنتَشِرُ ببطءٍ من موضِعها الأصلي وسَيقلُّ لونُ الحِبر كلما ابتَعدَ عن النقطة

الأصلية مكَوِّنًا تدَرُّجًا فيزيائيًا. يمكن أن يُستخدَم هذا التَّدَرج كمَصدر للمعلومات، فمَثلًا: إذا كان تركيز جُزَيئات الحِبر مرتفِعًا فسنَعرِفُ أننا قريبون من مَركز الكأس حيث سقَطَتْ نقطةُ الحِبر.

لنَستَبدل الكأس الآن بِكُرَةٍ من الخلايا المتماثِلة، وبَدلًا من الحِبر سنَحقِنُ أحَدَ أطراف الكُرَةِ بجُرعةٍ من بروتينٍ مُعيَّنٍ يَستطيع أن يُغيِّر صفات الخلايا. يَمنَحُ ذلك طريقةً لإضافة معلومات مَكانية لهذه الخلايا بحيث تَبدأ ببِناء شَكلٍ أو نمَطٍ. سيَنتَشرُ البروتين عَبرَ الخلايا مُشكِّلًا تَدَرُّجًا من التركيز المُرتفع في جِهَةِ الحَقنِ من الكُرَة، والتركيز المُنخَفِض في الجِهةِ الأخرى. إذا استَجابَت الخلايا بشكلٍ مختلفٍ للتركيز العالي والمُنخَفض، فإن تَدَرُّجَ تركيزِ البروتين يمكن أن يُقدِّمَ المعلومات اللازمة لبدء تكوين جَنينٍ معقَّد التركيب. وذلك مَثلًا إذا أنشَأ التركيزُ المرتفع من البروتين خلايا رأس، والتركيز المتوسط خلايا صَدر، والتركيز المُنخَفض خلايا بَطن، وإنّ تَدَرُّجًا بسيطًا لبروتينٍ واحد يمكنُ من حيث المَبدأ أن يؤدي إلى بَدء تكوينِ فراشةٍ صفراء جديدة. لا تكون الأشياءُ بهذه البساطة في الحياة عادة، ولكن هناك دليلٌ جيد على أن تَدَرُّجاتٍ في جزيئاتٍ مُؤشِّرةٍ عَبرَ أجسامِ الكائنات الناشِئة تُساهِمُ بالفِعل في ظُهورِ أشكالٍ بيولوجيةٍ متقدِّمَة.

كانت هذه مجموعةُ المَسائل التي درَسَها في أوائل الخمسينيات آلان تورينغ Alan Turing الذي اشتُهِرَ بِفَكِّ شيفرة إنيغماEnigma }جهاز الشيفرة الألماني{ وأحَدِ مؤسسي عِلم الكومبيوتر الحديث. تقدَّمَ باقتراحٍ إبداعي بَديلٍ لكيفية انتاج الجَنين للمعلومات المَكانية من داخله. صمَّمَ مجموعةً من المعادلات الرياضية التي توقَّعتْ سلوكَ مادتَين كيميائيتَين متفاعلتَين مع بعضها بعضًا تقوما بتفاعلاتٍ كيميائية معيّنة بينما تَنتَشِرا في هيكَل. وبشكلٍ غير متوقَّع، فإن معادلاته التي أَطلَقَ عليها اسم نماذج التفاعل-الانتشار، تَستطيعُ ترتيبَ مواد كيميائية في أنماط ثلاثية الأبعاد دقيقة وجميلة في معظم الأحيان. عند تَغيير مَعالِم معادلاتِه تُنظِّمُ المادَّتان نفسَيهما في نقاطٍ أو خطوطٍ أو بُقَعٍ منتظَمة متساوية الأبعاد. الجانب الجذّاب في نموذج تورينغ هو أن الأنماط تَظهَر تلقائيًا وِفقَ قواعد كيميائية بسيطة نسبيًا للتفاعل بين المادتَين. بكلمةٍ أخرى، يقدِّمُ ذلك طريقة تتمكَّن بها خلايا أو كائنات ناشِئة من انتاج المعلومات التي تحتاجها لكي تأخُذَ شَكلًا بذاتها ومن ذاتها كليًا. إنه نوعٌ من التَّنظيم الذاتي. توفي تورينغ قَبلَ أن تُختَبَرَ أفكارُه النظرية في أجِنَّةٍ حقيقية. ولكن علماء تطور الأحياء يعتقدون الآن أن هذه قد تكون الآلية التي تَضَعُ البُقَعَ على ظهور الفهود، والخطوطَ على كثيرٍ من الأسماك، وتوزيع الشَّعر في رأسكَ، بل وتقَسِّمُ يَدَ جَنين الإنسان الناشئ إلى خمسة أصابع متميزة.

عندما ننظُر إلى الحياة من وجهَةِ نَظَرٍ معلوماتية فمن المهمّ تقدير أن الأنظمة البيولوجية تطورت بالتدريج على مَرِّ ملايين السنين، وكما رأينا، تَنشَأ ابتكاراتُ الحياة نتيجةً لطَفرات وتنويعات وراثية عَفوية عَشوائية. ثم تخضَعُ هذه الطَّفرات للانتقاء الطبيعي بحيث يُحتَفَظُ بالتي تعمل بنجاح في الكائنات الحيّة الأكثر نجاحًا في البَقاء. وهذا يعني أن الأنظِمةَ الموجودة قد تغيّرت تَطَوريًا بالتَّجميع والتَّراكم التدريجي. يُشبِهُ ذلك من بعض الجوانب الهاتف المَحمول أو الكومبيوتر الذي يحتاج مِرارًا إلى تَحميلِ وتَثبيتِ تَحديثاتٍ بَرمَجية جديدة فيَكتَسبُ الجهاز وظائفَ جديدة إلا أن البرمجيات التي تُسَيِّرُهُ تُصبَحُ كذلك أكثر تَعقيدًا. وبالمِثل في الحياة، فإن كل هذه "التَّحديثات" الوراثية تعني أن النظام الكُلِّي في الخلية سيُصبح مع الزمن بالتدريج أكثر تعقيدًا. قد يؤدي هذا إلى الفائض والزيادة والحَشو، فبعضُ المُكَوِّنات قد تمتلكُ وظائفَ مُتداخِلَة، وغيرها قد تكون بقايا أجزاء مُلغَاة، أو تكون غير ضرورية للعمل الطبيعي ولكنها قد تتمكّن من التعويض إذا تعطَّلَت الأجزاء الرئيسية.

يُشيرُ كل ذلك إلى أن الأنظِمة الحيّة ربما تبدو أقلَّ كفاءة وأقلَّ عقلانية في إنشائها من دارات التَّحكم التي صَمَّمها العقلُ البشري بذكاء، وهذا سببٌ آخر لمَحدودية التَّشابه بين البيولوجيا وعلوم الحَوسَبة، وكما لاحَظَ سيدني برينر: "الرياضياتُ هي فَنُّ الكَمال، والفيزياء هي فَنُّ الأمثَل، أما البيولوجيا فهي فَنُّ المَقبول بسبب التطور". تستمر أشكالُ الحياة التي بَقِيَتْ بعد الانتقاء الطبيعي لأنها تعمل بنجاح، وليس بالضرورة لأنها تؤدي الأعمال بالطريقة المُثلى أو بالطريقة المباشرة. كل هذا التعقيد والوفرة يجعلُ تحليلَ شبكاتٍ الإشارات ومَسارات المَعلوماتية البيولوجية تَحديًا صَعبًا. وغالبًا لا يمكن ببساطة تَطبيق شَفرَة أوكام Occam’s Razor، أي البحث عن أبسَط توضيحٍ صالحٍ لتفسيرِ ظاهرةٍ في عِلم الأحياء، وقد يُزعِجُ هذا بعض الفيزيائيين الذين يتَحوَّلون لدراسةِ عِلم الأحياء. إذ يفضِّلُ الفيزيائيون الحلولَ الأنيقة البسيطة }الجميلة{، وربما لا يرتاحون لحقائق الأنظِمةِ الحيّة غير المُرَتَّبة والأقلّ كمالًا.

كافَحَ مختبري مِرارًا مع التكرار والتعقيدات التي أحدَثَها الانتقاءُ الطبيعي لأنها قد تُخفي المبادئ الأساسية عن كيفية عمل الأنظمة البيولوجية. اضطُررنا لهَندَسة خلايا الخَميرة وراثيًا لنُنتِجَ داراتِ تحكُّم في دَورة الخلية أبسَط كثيرًا. كان ذلك العمل مثل إزالة جميع الأجزاء غير الضرورية من السيارة في أداء عملها الأساسي، مثل تزيينات الهيكل والأنوار والمَقاعد... وترك الأساسيات فقط، مثل المحرك وعلبة نَقلِ السرعات والدواليب. نَجَحَ ذلك أكثر مما تصَورتُ، لأن خلايا خَميرتنا

المبسَّطة تمكَّنتْ من القيام بالخطوات الرئيسية في التحكّم بدَورة الخلية. كما أن تَجريدَ آليةٍ معقَّدةٍ إلى عناصِرِها الأساسية جَعَلَها أسهَل علينا في تحليل مَسار معلوماتها، وبالتالي اكتساب رؤية جديدة لنظام التَّحكم بدَورة الخَلية.

كانت المُوَرِّثَة cdc2 بين المجموعة المنتَقاة من مُنَظِّمات دَورة الخلية التي لا يمكن الاستِغناء عنها والتي كَشَفَتْها هذه التجربة. عندما تَسيرُ خلية الخَميرة على طريقِ دَورة الخلية، تنمو الخلية ذاتها باطّراد وتزدادُ كذلك كميةُ بروتين cdc2 ومُرَكَّب البروتين CDK الذي يحتوي على السيكلين. من وجهة نظر معلوماتية، تَستخدِمُ الخليةُ الكميةَ المتوفرة من بروتين CDK النشيط كمَعلومةٍ تَعكِسُ حَجمَ الخلية، كما أنها الإشارةَ الحاسِمة التي تبدأ الأحداثَ الكبيرة في دَورة الخلية. تتم فَسفَرَةُ البروتينات اللازمة في بداية دَورة الخلية عن طريق مُرَكَّب بروتين CDK مما يؤدي إلى استِنساخ الحمض النووي DNA في المرحلة S من الانقسام. أما البروتينات اللازمة بعد ذلك فتتم فَسفَرَتُها لاحِقًا مما يؤدي إلى الانقسام المتساوي وانقسام الخلية إلى اثنتَين في نهاية دَورة الخلية. البروتيناتُ "المبكرة" أكثر حساسية لنشاط إنزيم CDK من البروتينات "المتأخرة" ولذلك فهي تَتَعرَّضُ لعملية الفَسفَرة والتَّنشيط عند وجود كميةٍ أقلّ من إنزيم CDK في الخلية.

هذا النموذج البسيط من التَّحكم في دَورة الخلية أظهَر نشاطَ CDK كعاملِ تَنسيقٍ حاسِم في لُبِّ التَّحكم بدَورة الخلية. كان التفسير مُخَبَّأً عن أنظارنا بالتعقيدات السَّطحية في الشَّبكة، والوظائف الفائضَة للمُكَوِّنات المختلفة، ووجود آليات تحكّم أقلّ أهمية، وربما كذلك بسبب مَيلِ العَقلِ البَشَري لتَقَبُّل التعقيد بَدلًا من البحث عن البَساطة.

ركّزتُ في هذا الفَصل على الخلايا لأنها الوحدات الأساسية للحياة، ولكن نتائج التفكير بالحياة كمعلومات يمتدُّ فيما وراء الخلايا. هناك إمكانيةٌ حقيقية لكَسبِ رؤيةٍ قوية جديدة في جميع أجزاء عِلم الأحياء عند البحثِ عن طُرُقٍ لِفَهمِ كيفية تفاعل الجُزَيئات ونشاط الإنزيمات والعمليات الفيزيائية التي تُنتِج وتَنقُل وتَستَقبِل وتُخَزِّن وتُديرُ المعلومات. عندما يُصبِحُ هذا المَنهَج أكثر انتشارًا، ربما سيَنتَقِلُ عِلمُ الأحياء بعيدًا عن العالَم العادي المألوف الذي شَغَلَهُ في الماضي إلى عالَمٍ أكثر تجريدًا. وربما يَتَّجِهُ بذلك إلى ما يوازي الانتقالَ الذي حَدَثَ في الفيزياء من عالَم إسحاق نيوتن المَألوف إلى عالَم ألبرت آينشتاين المُجَرَّد الذي تَحكُمُهُ النسبية، ثم إلى عالَم الميكانيك الكَمّي الغريب الذي كَشَفَهُ فيرنر هايزنبرغ Werner Heisenberg وإيروين شرودينغر Erwin Schrödinger في النصف الأول من القَرن

العشرين. ربما ستؤدي تعقيدات عِلم الأحياء إلى تفسيراتٍ غريبة غير بديهية، ولكي يقومَ علماء البيولوجيا بذلك سيَحتاجون إلى مساعَدَةٍ أكبر من علماء في مجالات أخرى مثل الرياضيات والمعلوماتية والفيزياء، بل وحتى إلى الفلاسفة الذين اعتادوا على التفكير المُجَرَّد والتركيز الأقلّ على تجارب العالَم اليومية العادية.

سيُساعدُنا النَّظَر إلى الحياة كمعلومات أيضًا على فَهمِ مستوياتٍ أعلى من التنظيم البيولوجي ربما ستُضفِي الضوء على تفاعل الخلايا مع بعضها بعضًا لتُكَوِّنَ النُّسُج، وكيف تعمل الأعضاء مع بعضها بعضًا لتُكَوِّنَ كائِنًا حَيًّا تامَّ الأداء مثل الإنسان. ينطَبقُ الأمر كذلك حتى في مقاييس أكبر عندما نَدرُسُ كيف تتفاعل الكائنات الحيّة مع بعضها بعضًا ضمن النوع الواحد وبين الأنواع المختلفة، وكيف تعمل النُّظُم البيئية المَحَلية والمحيطُ الحيوي العام. توجَدُ إدارة المعلومات في كافة المقاييس من الجُزَيئات إلى المحيط الحيوي العام على مستوى الكَوكَب، ولها نتائج مهمّة على محاولات علماء الأحياء فَهمَ أنظمةِ الحياة. من الأفضل عادةً البحثُ عن تفسيرات قريبةٍ من مستوى الظاهرة المَدروسَة، ولكي تكون هذه التفسيراتُ مقبولةً فهي لا تحتاجُ دائمًا لتَصغيرِها إلى مستوى عالَم الجُزَيئات والمُوَرِّثات والبروتينات.

وعلى كل حال فقد توجَدُ أمورٌ مشترَكة في اسلوب إدارة المعلومات على مستوى معيَّن ربما تُضفِي الضوء على طريقة عمل الأشياء في عمليةٍ أكبَر أو أصغَر. فمثلًا، منطقُ عَمل نماذج رَدّ الفِعل التي تتحكَّم بإنزيمات الاستقلاب وتُنظِّمُ المُوَرِّثات أو تحافِظُ على الثَّبات الداخلي في الجسم لها تشابهاتٌ مع نماذج رَدِّ الفعل التي تَسمَحُ لعلماء البيئة بالوصول إلى تنبؤاتٍ أفضَل عن تغيّر الظروف الطبيعية عندما يَنقرِضُ نوعٌ معيّن أو يُهاجِر خارج بيئتِهِ التقليدية نتيجةَ تغيّرٍ مَناخِيّ أو دَمارِ موطِنِه الطبيعي.

بالنظر لاهتمامي بالخنافس والفراشات والحشرات بشكلٍ عام، فإن قَلقي يتزايدُ بشأن تَناقُص أعدادِ وتَنَوعِ الحشرات الملاحَظة في أجزاء كثيرة من العالَم. وما يثير القلق بشكلٍ خاص هو أننا لا نَعرفُ سببَ ذلك. هل هو تدميرُ موطِنها، أم تغيّر المَناخ، أم الثقافة الزراعية الوحيدة النَّمَط، أم التَّلوث الضوئي، أم الإفراط في استِخدام المبيدات، أو شيء آخر؟ اقتُرِحَتْ تفسيراتٌ كثيرة، ويتَحمَّسُ بعض الأشخاص كثيرًا لنظرياتِهم الخاصة، ولكن الحقيقة هي أننا لا نَعرفُ بالفعل. إذا أرَدنا عَملَ شيءٍ للمساعَدة في إنقاذِ الحشرات فسنَحتاجُ لفَهم التفاعلات بينها وبين بقية عالَمِها.

سيَتقدَّمُ ذلك كثيرًا بالعلماء الذين يعملون بطُرُقٍ مختلفة ويَتعاونون ويُفكّرون في هذه القضايا في سياق المعلومات.

مهما كان مستوى النظام البيولوجي الذي ندرُسُه، فإن محاولات تعميق فَهمِنا ستَتعلَّقُ بقدرتِنا على فَهم كيفية إدارة المعلومات فيه. إنها طريقةٌ للانتقال من وَصفِ التعقيدات إلى فَهمِها. إذا استَطَعنا فِعلَ ذلك سنَبدأ برؤية كيف تقومُ الفراشات الطائرة، والبكتيريات الآكِلة للسّكر، والجَنين الذي يتطَور، وجميع أشكال الحياة الأخرى باتِّخاذ الخطوة الحاسِمة في تحويل المعلومات إلى مَعرفة مُفيدة تستطيعُ استِخدَامَها لتحقيق هدَفِها في البقاء والنمو والتكاثر والتطور.

تَنبِثقُ عن تطوير فَهمِنا للأسُس الكيميائية والمعلوماتية للحياة قُدرةٌ مُتزايدةٌ على فَهمِ الحياة والقدرة على التَّدخل في عمليات الكائنات الحيّة. وهكذا، قَبلَ أن أَستخدِمَ الأفكار التي اكتَسبناها خلال صعود دَرَجاتِنا الخَمس لتِعريفِ ما هي الحياة، أريدُ أن أناقِشَ كيف نَستطيعُ استِخدامَ مَعارِفِ عِلمِ الأحياء لتَغيير العالَم.

تغيير العالَم

في سنة 2012 كان عَلَيَّ الذهاب إلى محطةِ الأبحاث الاسكتلندية في القطب الجنوبي. أردتُ دائمًا زيارة الصحراء المتجَمدة الواسِعة في منطقة القطب الجنوبي، نهايةُ الأرض حَرفيًا، وأخيرًا أُتيحَتْ ليَ هذه الفرصة. طُلِبَ منّي الخضوع لفَحصٍ طبيّ روتيني قَبلَ الرحلة، ولكن النتيجة كانت بعيدةً جدًا عن الفحص الروتيني، وواجَهتُ مَوتي لأول مرة في حياتي.

اتَّضَحَ أنني مُصابٌ بمَرَضٍ خطير في القلب، وخلال أسبوعَين من هذا الاكتشاف غَيرِ السَّار، خضَعتُ للتخدير العام على طاولة العمليات. فَتَحَ الجَرَّاح صَدري ووجَدَ الشَّرايين المُصابة التي فَشِلَتْ في توصيلِ ما يكفي من الدم لتروية عضَلَة قَلبي. أخَذَ أجزاء قصيرة من شريانٍ في صَدري ووريدٍ في ساقي ووصَلَها إلى شَرايين قلبي بحيث يتَجاوز الدمُ المُرورَ في المناطق المُصابة منها. صَحوتُ بعد ساعات قليلة بألمٍ وكَدَمات ولكن بقَلبٍ تم إصلاحُه.

أنقَذَت العمليةُ حياتي، واعتَمدَ نجاحُ العملية على فَهمِنا للحياة، بالإضافة إلى المَهارة الكبيرة والتعاطف العميق للطَّاقم الطبي الذي عالَجني. استَندَتْ كلُّ خطوةٍ من العملية على مَعرفةِ جسمِ الإنسان والنُّسُج والخلايا والكيمياء فيه. كان طبيبُ التخدير واثقًا من أن الأدويةَ التي استَخدَموها ستَجعلُ دماغي يَفقَد الإحساسَ بطريقةٍ يمكن استِرجاعُها. وتم حَقنُ سائِلٍ في قلبي أدّى إلى توقُّفِهِ عن النَّبضان تمامًا أكثر من ساعة، إذ يَحتوي هذا السائلُ على البوتاسيوم بتَركيزٍ يَعرفُ الطبيبُ أنه كان مرتفعًا ليُغيّر كيمياء خلايا عضَلَة قلبي بدِقَّةٍ ويَجعَلُها تَقِفُ في حالةِ الانبساط والارتخاء. قامَتْ آلةٌ بعَمل قلبي ورئتي، وقدَّمَت الأوكسجين إلى دَمي بشكلٍ سليم، وتمّ ضَخُّ دمي بالتَّدفُق الصحيح. خلال العملية وبَعدها، أَعطوني مضادات حيوية للوقاية من البكتيريات المُعدِيَة، ولم أتمكَّن من كتابة هذه الكلمات اليوم لولا كل هذه المَعارف المُتراكِمة عن الحياة.

مع تطور مَعارِفِنا عن الحياة، اكتَسبنا قوى جديدة كبيرة في معالجة وتغيير الكائنات الحيّة، ولكن علينا استِخدام هذه القوى بحِكمة وسَلامة، فالكائناتُ الحيَّةُ معقَّدةٌ، وإذا تدَخَّلنا بها قَبلَ أن نَفهَمَها جيدًا فقد نُسَبِّبُ من الأذى والضرر أكثر من الفائدة والحَلّ.

قُضِيَ على معظم البَشَر على مَرّ التاريخ، ليس بسبب الشيخوخة، بل بسبب الأمراض الإنتانية المُعدِيَة. قَضَتْ هجماتُ البكتيريات والفيروسات والفطور والدِّيدان وكثيرٍ من الطفيليات والأوبئة على ملايين من البَشَر، معظمهم في سِنّ الطفولة. اجتاحَ الطاعون الدُّمَّلِي العالَمَ في القَرن الرابع عشر وقَتَلَ نِصفَ سكان أوروبا تقريبًا. كان الموتُ حاضرًا دائمًا في الحياة اليومية على مَرِّ التاريخ.

لم يَعد الأمر كذلك هذه الأيام بفَضل توفُّر اللقاحات والنظافة العامة والأدوية المضادة للميكروبات، ولدينا الأدوات التي نحتاجها للوقاية والعلاج أو للسيطرة على كثير من الأمراض المُعدِيَة التي كانت قاتِلَة. حتى مَرَض الإيدز الذي اعتَبرَهُ البعضُ الطاعونَ الكبير القادم، يمكن التعامل معه الآن بالعناية المناسبة كحالَةٍ مُزمِنَةٍ مستقرّة. بعد أن اعتَمدَت الرعايةُ الصحية آلاف السنين بشكلٍ رئيسي على الخرافات والتفسيرات الغامِضة وكثير من العلاجات غير المؤكَّدَة والتي كانت خطيرة في بعض الأحيان، فإن هذا التَّحول يُعتَبرُ معجزةً حقيقية. ويَستَنِد كل هذا على مَعرفتِنا بالحياة التي أنتَجها العِلم ثم طُبِّقَتْ في العالَم.

وعلى كل حال مازال هناك أمامنا طريقٌ طويل في الصراع مع الآفَةِ القديمة من الأمراض المُعدِيَة. تَنتَشِرُ جائحة فيروس كورونا في ربيع سنة 2020 بينما أكتبُ هذه الكلمات، وتَزرَعُ الخوفَ والاضطراب في العالَم. هناك كثيرٌ من الأمراض الفيروسية مثل مرض كوفيد-19 الذي يسببه فيروس كورونا الجديد، والتي يمكن أن تكون مُمرِضَةً وقاتِلَة. وعلى الرغم من أن وباء إيبولا الذي انتَشَر في غرب أفريقيا في 2014-2015 قد حَفَّزَ تطوراتٍ مهمَّةٍ سريعة في تصنيع لقاحاتٍ فعَّالة، إلا أن مثل هذه التَّدخلات لا تكون نافِعة إلا إذا وَصَلَتْ إلى الناس الذين يحتاجونها في الوقت المناسب. هناك كثير من الناس سواء في الدول الفقيرة أو الغنية مازالوا لا يَحصلون على العلاجات الناجِعة. كما أنه من المَستَغرب أنّ السياسيين في بعض الدول المتقدِّمة قد تَجاهَلوا نصيحةَ علماء وخبراء فأضعَفوا إجراءات التعامل مع أوبئة وجائِحات مثل هذه، وقد أدّى هذا التَّجاهل إلى نتائجَ وخيمَة. يجب أن يكون تطبيق كل هذه الأمور بشكلٍ صحيح أولويةً مستعجلة في مستقبل الإنسانية.

يجب أن يَعتَزَّ المَحظوظون منّا بالعَيش في مجتمعات تُقَدِّمُ رعايةً طبية جيدة، وأن يُحافِظوا على الوقاية التي يَحصلون عليها. ويُعتَبرُ وجودُ رعايةٍ صحية تؤمِّنُ علاجًا مجانيًا مِثل عملية القلب التي أُجرِيَتْ لي في بريطانيا بِغَضِّ النظر عن قدرة المريض على دَفعِ تكاليفها، وهذه علامةٌ على تَحَضُّرِ المجتمع. وإن أنظِمَةُ صحية تُحَتِّمُ على المريض "الدَّفعَ عند تلقّي العلاج" هي أنظِمَةٌ تُعاقِبُ الأكثرَ فقرًا، وأنظِمَةُ التأمينِ العالية التكاليف تُعاقِبُ الأكثرَ حاجَة. ثم هناك مَن يَنتَقدُ بقَصدٍ سلامةَ وفعالية اللقاحات بدون دَليل كاف. يجب عليهم أن يتذَكَّروا أن رَفضَ لقاحاتٍ تم إثباتُ جَدواها سريريًا هو قضيةٌ أخلاقية، لأن فِعلَهُم هذا لا يُهدِّدُ سَلامَتَهم وسَلامَةَ أُسَرِهِم فقط، بل يُهَدِّدُ كذلك سَلامةَ كثيرين حولهم بتَعطيلِهم مَناعَةَ المجتمع والسَّماحَ للأمراض المُعدِيَة للانتشار بسهولة أكبر.

معركَتُنا مع الأمراضِ المُعدِيَة هي معركةٌ لن نَربَحَها تمامًا، وذلك بسبب التطور بالانتقاء الطبيعي. تَستطيعُ معظمُ البكتيريات والفيروسات التكاثرَ بسرعة كبيرة جدًا، كما أنّ مُوَرِّثاتِها تستطيعُ التأقلُمَ بسرعة. وهذا يعني أنّ سلالات جديدة من المَرَض قد تَنشَأ في أية لحظة، وهي تتطور باستمرار بطُرُقٍ مدهِشة لكي تُرواغَ أو تَخدَعَ أجهزةَ مَناعَتِنا وأدويَتِنا. ولذا يُعتُبرُ ظُهورُ مقاوَمةٍ ضدّ المضادات الحيوية تهديدًا خطيرًا، وهي مِنْ عَمَلِ الانتقاء الطبيعي الذي يَحدُثُ تحت أنظارنا بعواقِبَ خطيرة مُنذِرَة. إذا تعرَّضَت البكتيرياتُ للمضادات الحيوية دون أن تَقضي عليها تمامًا بالفِعل، فإن ذلك يَزيد من احتمال تَطَور مقاومةٍ لديها ضد الأدوية. ولذا فمِنَ المُهمّ عدم أخذِ المضادات الحيوية إلا عند وجود حاجَةٍ مؤكَّدَة لها، والحرصُ على تناولِ الجُرعَةِ الصحيحة منها ولمدةٍ كافية للقضاء على الميكروبات تمامًا حسب وَصفَة الطبيب. عدمُ الالتزام بذلك قد يؤدي إلى المخاطَرة بصحَتكَ وبصحةِ آخرين كذلك. لا يَقِلُّ عن ذلك خطورةً ما يفعله المزارعون بتَنقيطِ جُرعاتٍ صغيرة من هذه الأدوية للحيوانات من أجلِ تَسريعِ نمُوها.

نُشاهدُ الآن نشوءَ سلالات من البكتيريات تستطيع مقاومة أي تداخل يمكننا القيام به، والأمراضُ التي تسبِّبُها قد أصبَحتْ غير قابلة للعلاج. قد يُسبِّبُ ظُهورُ مثل هذه البكتيريات عودةَ الطب إلى الوراء ويشكّل خطورةً على ملايين البشر. تَخيَّلْ عالَمًا قد تُصابُ به أو يُصابَ فَردٌ من أسرتكَ بمَرضٍ التهابي لا يمكن علاجُهُ بِسَببِ خدشٍ من شوكةِ زهرة، أو عضَّة كَلب، أو حتى زيارة إلى مستشفى. غير أننا يجب ألا نَستسلمَ لهذا التهديد، وإدراكُ المشكلة هو أول خطوة أساسية لِحَلِّها. يجب أن نَستخدِمَ الأدوية المضادة للميكروبات الموجودة لدينا بحَذرٍ أكثر، كما يجب أن نَكتَشفَ طُرُقًا أفضَل لكَشفِ وتتَبّع الميكروبات المقاوِمَة للأدوية، وأن نُطَور أدوية جديدة قوية ضدها، وأن نَدعَم

الباحِثين في هذه المَجالات جيدًا. يجب أن نَستخدِمَ جميعَ مَعارفنا عن الحياة لحَلِّ هذه المشكلة لأن مستَقبلَنا قد يَعتَمد على ذلك.

تَحَسَّنَ متوسطُ عمر الإنسان تدريجيًا مع تَحَسُّنِ الرعاية الصحية والسَّيطرة على تهديد الأمراض المُعدِيَة، ولكن مع تَقَدُّمِ الناسِ في العَمر أصبحَ عليهم مواجَهة أمراض كثيرة أخرى غير مُعدِيَة مثل أمراض القلب والسكري والأمراض العَقلية والسرطان. أسبابُها الأساسية هي التَّقَدُّمُ في العُمر ونَمَطُ الحياةِ غير الصّحي، وهي تزدادُ في كافة أنحاء العالَم وتُشكّل تحديات كبيرة للمَرضى وللعلماء الذين يحاولون اكتِشاف علاجها.

السرطانُ مَثلًا ليس مَرَضًا واحِدًا بل أمراضًا كثيرة، فكلُّ نوعٍ من السرطان مختلفٌ، كما تتغيّر كل حالَةٍ مع الزمن فتُصبِحُ متقدِّمَةً مثل نظامٍ بيئيّ قائمٍ بذاتِه يَحتوي على أنواع متعدِّدة من الخلايا السرطانية، وتضُمُّ كلّ منها طَفرات وراثية مختلفة. مَرَّةً أخرى، هذا عَمَلُ التطور بالانتقاء الطبيعي. يَبدأُ السرطانُ عندما تكتَسِبُ خلايا تغيراتٍ وراثية جديدة وطَفرات تؤدي إلى انقسامها بطُرُقٍ غير منضَبطَة، وتَزدَهر لأنها تتمتَّع بميزة انتقائية، فهي تَستطيعُ احتكارَ مَوارد الجسم وتنمو أكثر من الخلايا الطبيعية مِن حولها وتَتجاهَل إشارات الجسم "بالتَّوقف".

يفيدُ تَحَسُّنُ بعض معلوماتنا عن الحياة في اتِّخاذ أساليب جديدة واعِدَة لعلاج السرطان، فمثلًا تَسعى علاجاتُ السرطان المَناعية لتعليم جهاز مَناعةِ الجسم على كَشفِ خلايا السرطان والقضاء عليها. وهذا مَنهَجٌ ذكيٌّ لأن جِهاز المَناعة يستطيعُ شَنَّ هجومٍ دقيق جِدًا على خلايا السرطان مع تجنّب الخلايا السليمة. كما تَظهَرُ علاجات جديدة تَستَند إلى أبحاث بدأتُها أنا وزملائي عند دراسة دَورة الخلية في الخَميرة. فالأدويةُ التي ترتَبط بالنسخة الإنسانية من بروتينات تنظيم دَورة الخلية CDK تُستخدَمُ الآن في علاج كثيرٍ من النساء المُصابات بسرطان الثدي. منذ أربعة عقود مَضَتْ، لم يكن لديَّ أية فكرة بأنَّ أبحاثَ خلايا الخَميرة ستقودُ مباشرة إلى علاجات جديدة للسرطان. لن نتمكَّنَ من القضاء تمامًا على السرطان لأنه ينشَأ كنتيجةٍ حتمية لقدرة الخلية على التأقلم والتطور، غير أن تَحَسُّنَ فَهمِنا للحياة سيمكّننا أكثر من اكتِشاف السرطان مبكرًا وعلاجِه بكفاءة أكبر. وأنا متأكّدٌ من أنه سيأتي وقتٌ عندما لا يُثير السرطانُ فيه المخاوفَ التي يُثيرها هذه الأيام.

إذا أردنا تَسريعَ التقدم في التعامل مع السرطان وغيره من الأمراض غير المُعدِيَة، فإن فَكَّ شيفرة المعلومات في مُوَرِّثاتِنا سيُقدِّم طُرُقًا جديدة مهمّة. عندما نُشِرَت النسخةُ الأولى من تسلسل

الحمض النووي DNA عند الإنسان سنة 2003، فَتَحَت البابَ أمام مستقبلٍ جديد في الطب الوقائي. تطَلَّعَ كثير من العلماء نحو عالَمٍ يمكنُ فيه تحديد عوامل الخطورة الوراثية لدى كل فَردٍ بشكل صحيح منذ الولادة، والتّنبؤ بكيفية تفاعل هذه العوامل مع اسلوب الحياة والغذاء. ولكن تحقيق هذا الهدف مَحفوفٌ بالتحديات العلمية والأخلاقية.

يَرجِع ذلك جزئيًا إلى تَعقيد الحياة العميق، فهناك قِلَّةٌ من الصِّفات الإنسانية التي تعمل تمامًا مثل بذور البازلاء التي دَرَسَها مَندِل في حديقَتِهِ، وهناك أمراضٌ قليلة تنشَأ بهذه الطريقة من وجودِ نِسَخٍ خاطِئةٍ "طَفرات" في مُوَرِّثَة واحدة، مثل داء هنتينغتون Huntington’s disease، والتَّلَيُّف الكِيسِي والهيموفيليا. تُسبِّبُ هذه الأمراض مُعاناة كبيرة وآلامًا، إلا أن كلًا منها لا يُصيبُ عددًا كبيرًا من الناس. وبالمقارَنة، فإن معظمَ الأمراض المنتَشرة، مثل أمراض القلب والسرطان وداء ألزهايمر لها أسبابٌ متعدِّدة وتنشَأ عن تأثيراتٍ مشترَكة لعَددٍ مِنَ المُوَرِّثات التي تعمل وتتفاعل مع بعضها بعضًا ومع الظروف البيئية التي نَعيشُ فيها بطُرُقٍ معقّدة يَصعب التّنبؤ بها. بدأنا في حَلِّ سلاسل الأسباب والنتائج المتشابِكَة التي تتضافَر بين طبيعتِنا وغذائِنا، إلا أن التقدُّمَ صَعبٌ وبطيء.

هناك مجالٌ يتقدَّمُ فيه فَهمُ الحياة كمعلومات، ويَجمَعُ الباحثون الآن مجموعات ضخمة من البيانات، مثل تسلسل المُوَرِّثات، ومعلومات نمَطِ الحياة، والسِّجلات الطبية لملايين البشر المختلفين، ولكن فَهمَ هذه البيانات الهائلة صَعبٌ، والتفاعلات بين المُوَرِّثات والبيئة معقّدة جدًا تُرهِقُ الباحثين إلى أقصَى قدرات تقنياتِهم الحالية حتى تلك الأساليب الجديدة مثل الذكاء الاصطناعي.

تَظهَر أفكارٌ جديدة، ويمكن الآن استِخدام نَمَطِ المُوَرِّثات لتمييز أفرادٍ لديهم نسبةُ خطورةٍ أعلى للإصابة بمرض القلب أو بالسّمنة مثلًا. يمكن استِخدام هذه المعلومات لنُصحِهم بشأن نمَطِ الحياة المناسِب لهم والأدوية التي تناسِبهم. وهذا تقدُّمٌ جيد ولكن المقدرة على التَّوصل لتَنبؤات صحيحة من مُوَرِّثاتِنا تتَحسَّن، ويجب أن نفكِّر جيدًا ما هي أفضَل الطُرُقِ لاستِخدام هذه المعلومات.

يُثيرُ التَّنبؤ الوراثي الصحيح بالمَخاطِر الصحية مَصاعِبَ خاصّة أمام الأنظِمة الصحية المُمَوَّلَة بالتأمين الصحي الشخصي. فإذا لم يوجَد تحكّم جيد باستِخدام معلوماتِ المُوَرِّثات فقد يَجِد بعضُ الأفراد أنفسَهم بلا تأمين صحي وبدون رعاية طبية أو أنهم سيُضطَّرون لدَفعِ مبالغ عالية للتأمين الصحي دون أن يَرتَكِبوا ذَنبًا. لا توجَد مثل هذه المَشاكل في الأنظِمة الصحية التي تقدِّمُ الرعاية الصحية مجانًا في مكان العلاج لأنهم سيَتمكَّنون من استِخدام التَّقدم في التنبؤ بالاستِعداد الوراثي وفي

تشخيص وعلاج بعض الأمراض بسهولة أكبر. وعلى كل حال، ليس من السَّهل التَّعايش مع مثل هذه المعلومات دائمًا، فلو تقدَّم عِلم الوراثة وتوصَّل إلى توقّعاتٍ صحيحة عن زمن وكيفية مَوتِكَ، فهل ستُريدُ مَعرفةَ ذلك؟

ثم هناك مسألة فَكِّ شيفرة العوامل الوراثية التي تؤثِّر على الأمور غير الصحية، مثل الذكاء العام والتحصيل التعليمي. عندما نَعرفُ أكثر عن الفروق الوراثية بين الأفراد يجب أن نتأكَّد من أن هذه الأفكار يجب ألا تُستخدَم أبدًا كأساس للتمييز والمُحاباة بين البَشَر.

مع التقدّم بالتّوازي مع القدرة على قراءة المادة الوراثية تأتي القدرة على تَصحيحِها وإعادة كتابَتِها. هناك إنزيمٌ اسمه CRISPR-Cas9 وهو أداةٌ قوية تعمل مثل مَقَصٍّ جُزَيئيٍّ يستطيع العلماءُ استَخدامَهُ لإجراء قَطعٍ دقيقٍ في جُزَيء الحمض النووي DNA لكي يُضيفوا أو يَحذفوا أو يغيّروا تسلسلَ مُوَرِّثَة، ويَسمى ذلك هَندَسَة المُوَرِّثَة أو هَندَسَة المادَّة الوراثية. تمكَّنَ علماءُ الأحياء من عمل ذلك في الكائنات الحيّة البسيطة مثل الخَميرة منذ حوالي 1980. وكان ذلك أحَد أسباب بَحثي في الخَميرة الانشطارية، ولكن CRISPR-Cas9 يُحَسِّنُ كثيرًا سرعةَ ودقّة وكفاءَةَ صياغةِ تسلسلِ الحمض النووي DNA، كما يسهِّل كثيرًا تصحيحَ وصِياغَةَ مُوَرِّثاتِ كثيرٍ من الأنواع الحيّة، بما فيها الإنسان.

يمكننا أن نتوقَّع مع الوقت ظُهورَ علاجاتٍ جديدة مَبنية على الهَندَسة الوراثية. نجَحَ الباحثون الآن في صُنعِ خلايا مقاوِمَة لميكروبات معيَّنة مثل الإيدز، أو استِخدامِها في الهجوم على الخلايا السرطانية مثلًا. ولكن محاوَلَة هَندَسَة الحمض النووي DNA في المرحلة المبكرة من تطور جَنينِ الإنسان يُعتَبرُ الآن عملًا شديدَ التَّهور لأنه يؤدي إلى تغيّرات وراثية في جميع خلايا الوَليد وسُلالَتِه في المستقبل. هناك مخاطرةٌ الآن بأن العلاجات المؤسَّسَة على المُوَرِّثات قد تغيّرُ فجأةً مُوَرِّثاتٍ أخرى في المادة الوراثية. وعلى كل حال فحتى لو تَمَّت هَندَسَةُ المُوَرِّثَة المَطلوبة وحدَها فإن هذه التغيّرات الوراثية قد تُسبِّبُ أيضًا مضاعفات جانبية يصعب التنبؤ بها وقد تكون خطرة. ببساطة، لا نفَهَم مادَّتَنا الوراثية حتى الآن بشكلٍ جيد لكي نَعرِفَ النتائج بشكلٍ مؤكَّد. ربما سيأتي وقتٌ تُصبِحُ فيه هذه الإجراءات آمِنَةً لكي تُخَلِّصَ عائلاتٍ من أمراض وراثية معيَّنة، مثل داء هنتينغتون أو التَّلَيُّف الكِيسِي، ولكن تطبيقَها لمُجرد التَّجميل، كأن نحاول الحصول على أطفال أذكَى أو أجمَل أو أكثر نجاحًا في الرياضة، هي مسألةٌ أخرى مختلفة تمامًا. تَشملُ هذه الناحيةُ واحدةً من أكثر النواحي

الشائِكَة في المَخاوف الأخلاقية الآن فيما يتعلَّق بتطبيقات عِلم الأحياء على حياة الإنسان. ولكن على الرغم من الحَديثِ عن استِخدام الهندسة الوراثية في صُنعِ أطفال مَرغوبين، إلا أنه مازال كلامًا في الهواء في الوقت الحاضر. يجب على كثير من آباء المستقبل أن يفكّروا بقضايا صَعبةَ التَّحدي في السنوات والعقود القادمة عندما يُطورُ العلماءُ قدرات أقوى في التَّنبؤ بتأثيراتِ الوراثة وتَغيير المُوَرِّثات والتَّعامل مع أجِنَّةِ الإنسان وخلاياه. يجب مناقشة جميع هذه القضايا في المجتمع ككلّ، ويجب أن تُناقَشَ الآن.

في الناحية الأخرى من الحياة، فإن التقدّم والتّطور في عِلم الخلية يَفتَحُ طُرُقًا لعلاج الأمراض التَّنَكُّسِيَّة Degenerative Diseases. انظُر إلى الخلايا الجَذعية مثلًا، إنها خلايا يَحتَفِظُ بها الجسم بحالةٍ غير ناضِجة مثل خلايا الجَنين المبكرة. أهمَّ سِمات الخلايا الجَذعية هي قدرتِها على الانقسام بتكرارٍ لتُنتِجَ خلايا جديدة يمكِنها اكتِساب خواصّ أكثر تخصُّصًا. يحتوي جِسمُ الجَنين النَّامي أو الوَليد على أعداد كبيرة من الخلايا الجَذعية لأنه يحتاج باستمرار إلى خلايا جديدة. ولكن الخلايا الجَذعية توجَد أيضًا في أجزاء كثيرة مختلفة من جِسم الإنسان البالِغ بعد فترةٍ طويلة من توقُّفِ نمُوِّه. تموتُ ملايين من خلايا جسمكَ أو تَتوَسَّفُ كل يوم، وهذا سببُ وجود سلالات من الخلايا الجَذعية في جلدكَ وعضلاتكَ ومخاطِيةَ أمعائكَ وحوافّ قَرنيةِ عَينكَ وفي كثير من النُّسُج المختلفة من جِسمكَ.

تعلَّمَ العلماءُ في السنوات الأخيرة كيف يَعزلون ويَزرعون خلايا جَذعية ويدفَعونها لتتطور إلى أنواع معيّنة من الخلايا مثل الأعصاب والكبد والعضلات. ويمكن الآن كذلك أخذُ خلايا تامة النضج من جلد مَريضٍ ومعاملتها بطريقةٍ تُعيدُ ساعَةَ التطور إلى الوراء وتُحَوِّلَها إلى خلايا جَذعية. يَطرحُ هذا احتمالًا مثيرًا بأنه قد يُصبِحُ مُمكِنًا ذات يوم أخذ مَسحَةٍ من داخلِ فمكَ واستَخدام الخلايا للحصول على أي نوعٍ آخر من خلايا جسمكَ تقريبًا. لو استطاعَ العلماء والأطباء التمكُّنَ تمامًا من هذه التقنيات وإثبات سَلامَتها، فإنهم ربما صَنعوا ثورةً في علاج الأمراض التَّنَكُّسِيَّة والإصابات، وثورةً في زَرعِ الأعضاء. قد يُصبِحُ ممكِنًا علاج حالات مُستَعصِيَة هذه الأيام في الجهاز العصبي والعضلات مثل داء باركينسون أو ضمور العضلات.

هذا التَّقدم هو جزءٌ مما أَوحَى بنبوءاتٍ جريئة تنشَأ كثير منها في وادي السيليكون في كاليفورنيا عن مستقبلٍ قريب سيُمكِنُ فيه وَقفُ الشيخوخة أو حتى استرجاع الشباب. من المهمّ أن

تظَلّ هذه الأحلام والإدعاءات مُستَنِدَةَ على الواقع العملي. أما بالنسبة لي فلن أختارَ حِفظَ دماغي أو جَسدي بالتبريد عندما يَحينُ وقتي انتظارًا لمستقبلٍ بعيدِ الاحتمال ربما يُستَعادُ فيه إيقاظِي وشبابي وحياتي إلى الأبد. الشيخوخةُ هي النتيجةُ النهائية لمَجموع الضرر والموت والإغلاق المُبَرمَج مُسبَقًا لخلايا الجسم وأعضائه. يُصبِحُ الجلد مُترهِّلًا حتى عند أولئك الذين يتمتَّعون بصحة جيدة، وتَفقدُ العضلاتُ قوَّتَها، ويَخسَر جهاز المَناعة كفاءَتَه، وتَضعفُ عضلةُ القلب. لا يوجَدُ سببٌ واحد لكلّ هذا، ولذا فمِنْ غير المتوقَّع التوصّل إلى إصلاحٍ مباشر صريح. ولكن لدي قليل من الشك بأن العقود القادمة ستشهد زيادة مطردة في متوسط العمر، والمهم كذلك هو تَحَسُّنُ نوعيةِ الحياة في الشيخوخة. لن نحيا إلى الأبد، ولكننا نَستطيعُ جميعًا الاستفادة من علاجات أفضَل تَستخدِمُ مزيجًا من الخلايا الجَذعية والأدوية الجديدة وعلاج المُوَرِّثات بالإضافة إلى ممارَسَة اسلوبِ حياةٍ أفضل لإنعاشِ وتَجديد أجزاء كثيرة من الأجسام المُسِنَّة المَريضة.

أحدَثَ تطبيقُ مَعارف عِلم الأحياء ثورةً في مَقدِرَتِنا على إصلاح أجسامٍ مَكسورة، وسَمَحَ للبشرية جمعاء أن تزدَهر. تزايدَ عددُ سكان العالَم منذ حوالي 10000 سنة قَبلَ الميلاد عندما بدأ أسلافُنا بالزراعة. لم يَروها بهذا الشكّل آنذاك، ولكن حَقَّقَ أجدادُنا ذلك بتطبيقِ مبادئ الانتقاء الاصطناعي في تَدجِين وتَهجين الحيوانات والنباتات. كانت الجائزةُ هي الحصول على موارد غذائية مَضمونة.

بالمقارَنة مع الزيادة التي حَدَثتْ فيما قَبل التاريخ، فقد ارتَفع عدد سكان العالَم بزيادة أكبر بكثير خلال حياتي وتضاعَفَ ثلاثَ مرات تقريبًا منذ ولادتي سنة 1949. هذا يعني زيادةً قدرها خَمسَة بلايين فَمٍ يجب إطعامُه كل يوم، ويجب انتاجُ كل هذا الطعام من مساحةِ الأرض المَزروعة نفسها تقريبًا. كان مفتاحُ النجاح في ذلك هو الثورةُ الزراعية التي حَدَثَتْ في الخمسينيات والستينيات. اقتَضَى ذلك تطويرُ الرّي والتّسميد ومكافَحة الآفات، والأهمّ من ذلك هو تطوير سلالات جديدة من المَحاصيل الغذائية. بالمقارَنة مع المزارعين عَبرَ التاريخ، فقد استطاع العلماء تَطبيقَ كل ما استَجمَعوه عن الوراثة والكيمياء الحيوية وعِلم النبات والتطور في انتاج سلالات نباتات جديدة متنوعة. كان النجاح باهرًا وأنتَجَ محاصيلَ جديدة ذات مَردودٍ أعلى بكثير. ولكن، لم يكن هذا بلا تَكلفة، فبَعضُ ممارَسات الزراعة المكثَّفَة الحديثة لها آثارٌ مدمِّرة على الأرض، وعلى مَعيشة المزارعين وعلى أنواع حيوية أخرى تُشارِكُ في بيئة المَحاصيل الزراعية. كما أن كمية الطعام

المَهدور كل يوم هي فضيحةٌ يجب حَلُّها. ولكن، بدون هذه التطبيقات الكبيرة للمعلومات البيولوجية في الممارَسات الزراعية خلال القَرن الماضي، ربما قَضَى ملايين من البَشَر جوعًا كل عام.

تستمر الزيادة في عدد سكان العالَم هذه الأيام، ومع هذه الزيادة هناك قلقٌ متزايد بشأن الضَّررِ الذي يُحدِثُهُ نشاط الإنسانية في العالَم الحَيّ. وبالنظر إلى الأمام نواجِهُ التّحدي الصارخ المشترَك في ضرورة انتاجِ مَزيدٍ من الغذاء من الأرض بينما نَستمرُّ في محاولة تَخفيفِ تأثيرِنا على البيئة. أعتِقدُ بأننا سنَحتاجُ الذهاب فيما وراء الطُّرُقِ التي أدَّتْ إلى الثورة الزراعية في القَرن الماضي، وتَصميم طُرُقٍ أكثر كفاءة وإبداعًا في انتاج الغذاء.

ولكن لسوء الحظ فإن محاولات صُنعِ سلالات معدَّلَة وراثيًا من النباتات والمواشي ذات صفات مُحَسَّنَة قد تم وَقفُها في معظم الأحيان، ولم يكن ذلك عادةً بسبب دلائل علمية أو فَهم أفضل. حَضرتُ مناظراتٍ حول سلامَةِ الأغذية المُعدَّلَة وراثيًا ورأيتُها تَنحَرِفُ غالبًا بسوءِ الفَهم وبجماعاتِ الضَّغط وإقحامِ معلوماتٍ مُضَلِّلَة. انظُر مثلًا في قضية الأرز الذَّهبي الذي تم تعديلُهُ وراثيًا لإدخال مُوَرِّثَةٍ بكتيريةٍ في أحَدِ صبغياتِ نبات الأرز تَجعلُهُ يُنتِجُ كميات كبيرة من الفيتامين A. هناك حوالي 250 مليون طفل في العالَم لديهم نَقصٌ في هذا الفيتامين وهو سببٌ مهمّ للإصابة بالعَشى الليلي والوفاة أحيانًا. يُمكِن للأرز الذَّهبي أن يقدِّمَ طريقةً مباشرة لمساعدَتِهم، ومع ذلك فقد حارَبَتْهُ باستمرار حَملاتُ المُحافِظينَ على البيئة والمُنظَّمات غير الحكومية التي خَرَّبَتْ بعضَ أماكِن حقول الاختبار التي أُنشِئتْ لاختبار سَلامَتِهِ وتأثِيرِه على البيئة.

هل من المَقبول حِرمان فقراء العالَم من اختراعاتٍ قد تُحَسِّنُ صِحتَهم وأَمنَهم الغذائي، خاصة إذا استَنَدَ ذلك الحِرمان على الموضَة وعلى آراء غير مُطَّلِعَة، بَدلًا من الاستناد إلى العِلم الصحيح؟ لا يوجَدُ شيءٌ جوهري خطير أو سُموم في الأغذية المُعدَّلَة وراثيًا، والمهمّ فِعليًا هو أن جميع النباتات والمواشي يجب أن تَخضَعَ بالمِثل لاختبارات السَّلامة والكفاءة، وفَحصِ تأثيراتها المتوقَّعة على البيئة والاقتصاد مهما كانت طريقة انتاجِها. يجب علينا مراعاةَ ما سيقولُهُ العِلم عن المخاطِر والفوائد دون التَّحيز لمَصالح شركات تجارية، أو لآراء عقائدية لمُنظَّمات غير حكومية، ولا للاهتمامات المالية لهذه الأطراف.

أعتَقدُ بأننا في العقود القادمة سنَستَخدم تقنيات الهَندَسة الوراثية أكثرَ من ذي قَبل. قد يكون هذا عَصرُ التأثير القويّ لفَرعٍ جديدٍ نسبيًا من العلوم هو البيولوجيا الاصطناعية *Synthetic*

Biology. يَسعى علماءُ البيولوجيا الاصطناعية إلى الذهاب فيما وراء المَناهج الأكثر تركيزًا والأساليب التدريجية التي استُخدِمَتْ تقليديًا في الهندسة الوراثية لكتابة تغييراتٍ أكثر عمقًا في بَرمَجة مُوَرِّثاتِ الكائنات الحَيَّة.

التحدياتُ التقنية كبيرة في هذا المجال، وهناك تساؤلاتٌ حول كيفية السيطرة والاحتواء على هذه الأنواع الجديدة، ولكن الجوائز المتوقَّعة قد تكون مهمَّة. وذلك لأنَّ كيمياء الحياة أكثر قدرة على التأقلم وأعلى كفاءة من معظم التفاعلات الكيميائية التي استطاع الإنسان إجراءها في المختبرات أو في المَصانع. ربما نستطيعُ إعادةَ تنظيم وتغيير أهداف بَراعَة الحياة الكيميائية بطُرُقٍ قوية جديدة في التعديل الوراثي والبيولوجيا الاصطناعية. قد يكون استخدام البيولوجيا الاصطناعية ممكنًا لصُنعِ مَحاصيل وثروة حيوانية مُحَسَّنة غذائيًا، ولكنها قد تُطَبَّقُ بشكلٍ أوسَع من ذلك، فربما نستطيع صُنعَ نباتات وحيوانات وميكروبات أُعيدَتْ هندَسَتُها لانتاج أنماط جديدة تمامًا من الأدوية والوقود والأقمشة ومواد البناء.

الأنظمةُ البيولوجية الجديدة بهَندَسَتِها الجديدة ربما تُعالِجُ تغيير الطقس. هناك اجماعٌ علميٌّ واضِح على أن كَوكَبَنا قد دَخلَ مرحلةً متسارِعة من الاحتِباس الحراري. هذا خَطَرٌ عظيم لمستقبلنا ولمستقبل عالَم الأحياء الذي نُشَكِّلُ نحن جزءًا منه. التحدي المُلِحُّ الآن هو تخفيضُ كمية غازات البيت الزجاجي التي نَبعَثُها وذلك لتَخفيض الاحتِباس الحراري. لو تمكَّنا من إعادة هندسة نباتاتٍ لتَقومَ بالبِناء الضوئي بطريقةٍ أكثر كفاءة مما تفعله الآن، أو لجَعلها تقومُ بذلك على مقياس صناعي خارج نطاق حدود الخلايا الحَيّة، فقد يُصبِحُ مُمكِنًا صُنع وقودٍ بيولوجي ومواد صناعية وسيطَة محايِدَة بالنسبة للكربون. ربما يتمكّن العلماءُ كذلك من هندسة نباتات جديدة تستطيع العيشَ في ظروفٍ بيئية صَعبة، كأن تعيشَ في تُربَةٍ فقيرة أو في مناطق مُعرَّضَة للجفاف لم تَسمحَ بالنمو النباتي فيها من قَبل. قد تُستخدَم مثل هذه النباتات ليس فقط لتغذية العالَم، بل لتَخفيض مَخزون غاز ثاني أكسيد الكربون أيضًا لتُساعد في التعامل مع الاحتِباس الحراري. قد تشكّل أيضًا أساسًا لمَصانع حيوية تعملُ بطُرُقٍ مُستَدامَة، وبدلًا من الاعتماد على الوقود الأُحفوري (الفحم والبترول) ربما نتمكَّن من انتاج أنظِمَةٍ بيولوجية تَتغذَّى بشكلٍ أكثر كفاءة على النفايات والمُنتَجات الثانوية وأشعة الشمس.

بالتوازي مع هذه الأشكال المُهندَسَة من الحياة، هناك هدفٌ آخر هو زيادة المساحَة الكُلِّية لسطح الكوكب المُغطَّاة بكائناتٍ حَيَّة قادرة على البِناء الضوئي. وهذا ليسَ اقتراحًا سَهلًا مثلما يبدو، فَلِكَي يُحَقِّقَ تأثيرًا مهمًّا يجب أن يُطَبَّقَ على نِطاقٍ هائل، كما يجب الأخذُ بِعَين الاعتِبار أيضًا مسألة التخزين الطويل المَدى للكربون بعدما تَموتُ هذه النباتات أو يتم حَصادُها. ربما يقتَضي هذا غابات أكثر، أو زراعة الأُشنِيّات والأعشاب في البحار، والتَّشجيع على تشكّل نباتات المستنقعات. ولكي يَعملُ أيُّ تغييرٍ بكفاءة وبسرعة فإن ذلك يَضغَطُ على فَهمِنا لآليات البيئة المَحَلية إلى أقصَاه، والنَّقصُ الجاري في عدَدِ الحشرات الواسِع الانتشار وغَير المَفهوم هو مِثالٌ صَريحٌ على هذه النقطة. يتعلَّقُ مستقبلُنا بأنواعِ الحشرات لأنها تقومُ بتلقيحِ كثير من مَحاصيلِنا الغذائية وبتَخصِيبِ التّربة وأمور أخرى أكثر من ذلك.

يحتاجُ التقدُّم في جميع هذه المجالات إلى فَهمٍ أفضَل للحياة وكيفية عملها. يجب على جميع علماء الأحياء في كافة الاختصاصات أن يَعمَلوا معًا، علماءُ البيولوجيا الجُزَيئية والخَلَوية، وعلماء الوراثة، وعِلم النبات، وعِلم الحيوان، وعلماء البيئة... لكي يضمَنوا استمرار ازدِهار الحضارة الإنسانية مع بقية عالَم الأحياء وليس على حسابهم. ولكي تَنجَح هذه الجهود نحتاجُ لمواجهة جَهلِنا، فعلَى الرغم من التقدُّم الكبير الذي حقَّقناه في فَهم عَمل الحياة، إلا أنَّ فَهمنا مازال جُزئيًا، وإلى حَدٍّ كبير أحيانًا. إذا أرَدنا التَّدخل في أنظِمَة الحياة بشكلٍ سليمٍ وبَنّاء وآمِن لتحقيق بعض آمالنا العملية الطَّموحة، فمازال هناك كثير يجب أن نتَعلَّمه.

تطويرُ تطبيقاتٍ جديدة يجب أنْ يسير مع جهود التَّعلم عن الحياة. وكما صاغَها الكيميائي جورج بورتر George Porter: "إنَّ تَغذيةَ العِلم التَّطبيقي بتَجويع العلوم الأساسية يُشبِه التوفير في أساسات بِناء لكي يَرتَفع البِناء أكثر، وسيؤدي ذلك بسرعة إلى انهياره". ولكن بالمنطق ذاته، ستكون أنانيةً من جانب العلماء إذا لم يُلاحِظوا ضرورةَ تقديم تطبيقات مفيدة في كل فرصة مناسبة. عندما نَرى فُرَصًا لاستِخدامِ المِعرفة من أجل الصالح العام، يجب أن نفعَل ذلك.

يَطرَحُ هذا أسئلةً جديدة ومسائل أكثر، فكيف نتَّفِقُ على ما نُسَميه "الصالح العام"؟ إذا كانت علاجاتُ السرطان الجديدة غالية جدًا فمَن الذي سيَحصل عليها؟ وهل ستُعتَبَرُ الدَّعوةُ إلى رَفضِ اللقاحات دون دليلٍ كافٍ، أو إساءَةُ استِخدام المضادات الحيوية جرائمَ جِنائية؟ هل تَطبيقُ عقوبةٍ على بعضِ السلوكيات الإجرامية المعيّنة صحيحٌ إذا كانت تتأثَّر بفِعلِ مُوَرِّثاتٍ شخصية؟ إذا تمكَّنَت

الهندسةُ الوراثية من تخليصِ عائلات من داء هنتينغتون، فهل ستكونُ هذه العائلات حُرَّةً في استِخدامِها؟ هل سيُقبَلُ ذات يوم استِنساخ انسان بالِغ؟ وإذا اقتَضى التَّحكُّم بالتغيّر المَناخي زَرعَ المحيطات ببلايين الأُشنِيَّات المُعَدَّلَة وراثيًا، فهل سيَتمُّ تطبيقُ ذلك؟

هذه بعض الأسئلة المُلِحَّة والمُشَدَّدَة أحيانًا التي يَدفَعُنا إلى طَرحِها تَقدُّمُنا في فَهمِ الحياة. والطريقة الوحيدة للتوصُّل إلى إجاباتِ مَقبولة هي من خلال حِوارٍ مستمر صادق مفتوح. يَترَتَّبُ على العلماء لَعب دَور خاصّ في هذا الحِوار لأنهم هم الذين عليهم تقديمُ تفسيرات واضحة لفوائد ومَخاطِر كلّ خطوة نحو التقدّم. ولكن المجتمع ككلّ يجب أن يَقودَ الحِوار. يجب على القادة السياسيين أن يَنخَرطوا في هذه القضايا، ومازالت قلّة قليلةٌ منهم هذه الأيام تُدرِكُ بدرجةٍ كافية التأثيرَ العميق للعِلم والتقنيات على حياتِنا واقتصاداتِنا.

ولكنَّ دَور السياسة يأتي بَعدَ العِلم وليس قَبلَه. لقد شاهَدَ العالَم مِرارًا كيف يمكن أن تَسوءَ الأمور كثيرًا إذا انعكَسَتْ هذه الحالة، فخلال الحرب الباردة استطاعَ الاتحاد السوفييتي بِناءَ قنبلةٍ نووية وإرسالَ أول إنسان إلى الفضاء، إلا أنَّ العملَ في الوراثة وتَحسين المَحاصيل تضَرَّرَ كثيرًا لأسباب إيديولوجية عندما أيَّدَ ستالين الشيطان المزيَّف ليسنكو Lysenko الذي رَفَضَ عِلمَ الوراثة المَندلية (عالِم البيولوجيا السوفييتي توفيم ليسنكو (1898-1976) الذي كان مدير معهد الوراثة في أكاديمية العلوم ورفَضَ أبحاثَ المُوَرِّثات واضطَهَد كلَّ مَن أيَّدَها)، وأدّى ذلك إلى حدوث مَجاعات. ورأينا مؤخَّرًا تأخُّرَ رَدِّ الفِعل على التغيّر المَناخي بسبب رافِضِيهِ الذين تَجاهَلوا أو قَوضوا الفَهم العلمي قَصدًا. يجب أن تقودَ المَعرفة الحوارات حول الصالح العام بالدليل والتفكير العَقلاني وليس بالعَقائد والإيمان الذي لا أساس له، ولا بالطَّمع والتَّطرف السياسي.

يجب ألا نرتَكَبِ الخطأ بالشَّكِ في قيمةِ العِلم في حَدِّ ذاته. يحتاجُ العالَم إلى العِلم والتقدّم الذي يستطيع تقدَيمَه. لدينا نحن البَشَر فرصةً فريدةً لاستِخدامِ مَعارفِنا عن الحياة لتَغيير العالِم بصِفتِنا عقلاء وفضوليين وأذكياء، وعلينا يَقَعُ واجبُ القيام بما نَستطيعُهُ لتَحسين الحياة، ليس فقط من أجل عائلاتِنا ومجتمعاتِنا المَحَلية، بل كذلك من أجل جميع الأجيال القادمة ومن أجل عالَم الأحياء الذي نشكّل جُزءًا لا يَنفَكُّ عنه. يُقدِّمُ عالَم الأحياء مِن حولِنا للإنسانيةِ مَصدَرًا لانهائيًا من الأسئلة، كما أنه يَدعَمُ وجودَنا نَفسَه.

ما هي الحياة؟

إنه سؤالٌ كبير. كانت الإجابة التي حصَلتُ عليها في المدرسة أنّ الكائنات الحَيَّة تُظهِرُ الحركةَ والتنفس والإحساس والنمو والتكاثر والإفراز والتغذية. وهو مُلَخَّصٌ أنيق للأمور التي تقومُ بها الكائنات الحَيَّة، إلا أنها ليست إجابَةً مُرضِيَةً على هذا السؤال. أريدُ أنْ أتَّخِذَ مَنحَى مختلفًا، فبالاستناد إلى الخطوات التي سِرنا فيها لفَهمِ الأفكار الكبيرة في عِلم الأحياء، سأحاولُ استَخلاص مجموعةٍ من المبادئ التي يمكن أن نَستخدِمَها في تعريف الحياة. ستَسمَح لنا هذه المبادئ برؤيةٍ أعمَق عن كيفية عمَل الحياة، وكيف بَدَأتْ، وعن طبيعة العلاقات التي تَربط كلَّ الحياة في كَوكَبنا.

حاوَلَ كثيرون بالطبع الإجابةَ على هذا السؤال. أكَّدَ إيرفن شرودنغر Erwin Schrödinger على الوراثة والمعلومات في كتابِهِ النَّافِذِ البَصيرة "ما هي الحياة؟" الذي نُشِرَ سنة 1944. اقتَرَحَ وجودَ "برنامج مَكتوب" للحياة نَعرِفُ الآن أنه مَكتوبٌ بلُغَةِ الحمض النووي DNA. ولكنه أنهَى كتابَهُ بتقديم اقتراحٍ قريبٍ من مَبدأ الحَيوية Vitalism وأنه لكي نفهَمَ فِعلًا كيف تعمل الحياة، ربما نحتاجُ إلى قانون فيزيائي من نوعٍ جديد لم نَكتَشِفه بَعد.

بَعدَ ذلك بسنوات قليلة كتَبَ عالِم البيولوجيا الأصولي هالدين J. B. S. Haldane وهو بريطانيٌّ من أصلٍ هنديّ كتابًا آخَر بالعنوان ذاته كذلك: "ما هي الحياة؟" صَرَّحَ فيه "لن أجيبَ على هذا السؤال. في الحقيقة، أشكُّ بإمكانية تقديم أية إجابة وافية". شَبَّهَ الشعور أن يكون المَرء حَيًّا إلى الإحساس باللون أو بالألم أو بالتعب، واقتَرَحَ "أننا لا نَستطيع وَصفَها بأيّ اصطِلاح آخَر". أتعاطفُ مع رؤيةِ هالدين، إلا أنه ذَكَّرني بقاضي المَحكَمة الدستورية الأمريكية العليا، القاضي بوتر Justice Potter الذي عَرَّفَ المَوادَ الإباحِية سنة 1964 بقوله: "أعرِفُها عندما أراها".

لم يَتردَّد عالِم الوراثة هيرمان مولر Hermann Muller الحائز على جائزة نوبل عندما قَدَّمَ سنة 1966 تعريفًا مُجَرَّدًا للكائنِ الحَيّ أنه ببساطة "ذلك الذي يمتلكُ القدرةَ على التطور". عَرَّفَ مولر جيدًا بفكرة داروين العظيمة عن التطور بالانتقاء الطبيعي كجَوهَرٍ لتفكيره عما هي الحياة. وهذه عمليةٌ في الحقيقة، العمليةُ الوحيدة التي نَعرِفُها، تستطيعُ النُّشوءَ من خِلالِها كائناتٌ حَيَّةٌ متنوعَة منظَّمة ذات هَدَفٍ وغايَة دون حاجَة لتَدَخُّلِ خالِقٍ فيما وراء الطبيعة.

أول مَبدأ سأستَخدِمُهُ لتعريف الحياة هو القدرة على التطور بالانتقاء الطبيعي. كما شَرحتُ في الفَصل عن الانتقاء الطبيعي فهو يَعتَمد على ثلاثِ صِفات رئيسية، فلِكَي تتطور الكائناتُ الحَيَّة يجب أن تتكاثَر، وأن يكون لدَيها نظامٌ وراثي، وأن يُظهِرَ هذا النظامُ الوراثي قابليةً للتنوع. كلُّ كائنات لديها هذه الصِّفات تَستطيعَ أن تتطَور، وستَتطَور.

المبدأُ الثاني هو أن أشكالَ الحياة هي كائناتٌ محدَّدَة فيزيائيًا، أي أنها أشكالٌ منفَصِلَة ولكنها تتواصَلُ مع بيئتِها. استُنبِطَ هذا المبدأ من فِكرة الخَلية، وهي أصغَر وحدَة تَضُمُّ جميع صِفات الحياة. يَستَدعي هذا المبدأ فيزيائيةَ الحياة التي تَستَبعدُ برامجَ الكومبيوتر والكيانات الثقافية عن اعتبارِها أشكالًا حَيَّة حتى لو أنها تُظهِرُ تطَورًا.

المبدأ الثالث هو أن الكائنات الحَيَّة هي آلاتٌ كيميائية وفيزيائية ومَعلوماتية تُشَكِّلُ استِقلابَها الخاصّ وتَستَخدِمُهُ في المحافَظةِ على ذاتِها وفي النمو والتكاثر. ويتم تَنظيمُ هذه الآلات الحَيَّة بإدارة المعلومات لكي تعملَ الكائنات الحَيَّةُ ككلّ يتحركُ بهَدَفٍ وقَصد.

تَعَرِّفُ هذه المبادئ الثلاثة ما هي الحياة. كلُّ كيان يَعملُ وِفقَ جميع هذه المبادئ يمكنُ اعتِباره كائنًا حَيًّا.

يحتاجُ الشكلُ غير العادي من الكيمياء الذي يُحقِّقُ احتياجات الحياة إلى توضيحٍ أكثر للوصول إلى تقديرٍ تامّ لكيفية عَمَلِ الكائنات الحيَّة. الصِّفَةُ المَركزية لهذه الكيمياء هي أنها بُنِيَتْ حول جُزَيئات كبيرة مِنَ البوليمرات تتألفُ أساسًا من ذَرَّات متَّصِلَة من الكربون. الحمضُ النووي DNA هو واحدٌ منها وغايَتُهُ الجَوهرية أن يعمَلَ كمَخزَنٍ للمعلومات مَوثوقٍ جدًا وطَويل المَدى. يحفَظُ اللولب الثنائي للحمض النووي DNA في داخلِهِ عناصِرَهُ اللازمة لاحتواء المعلومات (قواعد النيوكليوتيدات الأربع) في اللولب الثنائي حيث تَستَقِرُّ وتَحتَمي جيدًا لدَرجة أن العلماء الذين يَدرسون

الحمض النووي القديم قد استَطاعوا كَشفَ تَسلسل DNA تم الحصول عليه من كائناتٍ عاشَتْ وماتَتْ منذ زَمَنٍ بعيد جِدًا، مثل الحمض النووي لِحصانٍ تَجمَّدَ في تُربَةٍ صَقيعِيَّةٍ منذ حوالي مليون سنة!

ولكن المعلومات المَحفوظَة في تسلسل الحمض النووي DNA للمُوَرِّثات لا يمكن أن يَظَلَّ مَخفِيًا وخامِلًا. يجب أن يُحَوَّلَ إلى عَمَلٍ وأن يُوَلِّدَ العمليات الاستِقلابية والهياكل الفيزيائية التي تُكَوِّن الحياة. يجب أن تَتَرجَمَ المعلوماتُ المَحفوظة في حمض نووي ثابت كيميائيًا لا يُثيرُ الاهتمام إلى جُزَئياتٍ نشيطَةٍ كيميائيًا هي البروتينات.

البروتيناتُ هي أيضًا بوليمرات مَبنِيَّة مِن سَلاسل الكربون، ولكن بالمقارَنة مع الحمض النووي DNA فإن معظَم الأجزاء المتَنوعة كيميائيًا قي البروتينات موجودَةٌ على سَطحِ جُزَيئاتها. وهذا يعني أنها تؤثِّر على الشَّكل الثلاثي الأبعَاد للبروتين وتَتفاعَل مع العالَم. وذلك ما يَسمحُ لها في النهاية القيام بوظائفها العديدة وبِناء وحِفظِ وتَكاثُر الآلات الكيميائية الحَيَّة. بالمقارَنة مع الحمض النووي DNA أيضًا فإذا تَضَرَّرَت البروتينات أو تَحطَّمَتْ، تستطيعُ الخلية ببساطة أن تُعَوِّضَها بِصُنعِ جُزَيئاتٍ بروتينية جديدة منها.

لا أستطيعُ تُخَيُّلَ حَلٍّ أكثرَ أناقَة: أشكالٌ مختلفة من سَلاسِلَ خَطِّية من الكربون تَصنَعُ أجهزةً مستقرة كيميائيًا لحِفظ المعلومات ونَشاطاتٍ كيميائية متنوعة جِدًا. أرَى أنَّ هذه الناحية من كيمياء الحياة بسيطةٌ جِدًا ومدهِشةٌ تمامًا في الوقت نفسه. الطريقةُ التي تَجمَعُ فيها الحياةُ كيمياءَ بوليمرات معقَّدة مع حِفظٍ خَطِّيٍّ للمعلومات هي مَبدأٌ مُقنِعٌ جِدًا، وأعتَقدُ بأنه ليس فقط جَوهر الحياة على الأرض، بل من المحتمل كذلك أن يكون مهمًّا للحياة في أيِّ مكان آخَر في الكَون.

على الرغم من أننا وجميع أشكال الحياة المَعروفة نَعتَمدُ على بوليمرات الكربون، إلا أننا يجب ألا نُقَيِّدَ تفكيرَنا عن الحياة بتَجربَتِنا عن كيميائية الحياة على الأرض. إذ يُمكِنُ تَخَيُّلُ وجودَ حياةٍ في أماكِنَ أخرى من الكَون تَستَخدِمُ الكربون بطُرُقٍ مختلفة، أو حياةٍ لا تؤسَّسُ على عُنصِرِ الكربون أصلًا. اقتَرَحَ الكيميائي البريطاني وعالِم بيولوجيا الجُزَيئات غراهام كيرنز-سميث Graham Cairns-Smith في الستينيات شَكلَ حياةٍ بدائيةٍ يؤسَّسُ على حُبيباتٍ ذاتية التكاثر من الطِّين المُتَبَلور مَثلًا.

تَخَيَّلَ كيرنز-سميث حُبيباتِ الطِّين المؤلَّفَة أساسًا من السيليكون، وهو عنصرٌ مشهورٌ اختيارُهُ من جِهَةِ كتّاب الخَيال العِلمي عندما يتَخيَّلونَ أشكالَ حياةٍ في عوالِمَ مختلفة، لأن ذَرَّةَ السيليكون تستطيعُ تأليفَ أربَع روابِط مِثلَ الكربون، وتستطيعُ تَشكيلَ بوليمرات هي أساسُ مُحكِماتِ الإغلاقِ السيليكونية والموادّ اللاصِقة وموادّ التّشحيم وأوعية المطبخ. بوليمراتُ السيليكون مِنْ حيث المَبدأ كبيرةٌ ومتنوعة لدَرجة تُمَكِّنُها من احتواءِ معلوماتٍ بيولوجية، ولكن على الرغم من أنَّ السيليكون أكثرُ تَواجُدًا في الأرض مِنَ الكربون، إلا أنَّ الحياةَ هنا تَرتَكِزُ أساسًا على الكربون. ربما يَرجِعُ ذلك إلى أنَّ السيليكون في ظروفِ البيئةِ على سَطحِ كَوكَبنا لا يُشكِّلُ روابِطَ كيميائية مع ذَرّاتٍ أخرى بسرعةٍ مِثلَ الكربون. وبالتالي فهو لا يُنتِجُ تَنوعًا كيميائيًا كافيًا للحياة. وعلى كلٍّ سيكون من الغَباء تَجاهُلُ إمكانيةَ وجودِ حياةٍ تَرتَكِزُ على السيليكون، أو حياةٍ تَعتَمدُ على كيمياء مختلفة تمامًا ربما تَزدَهِرُ في ظروفٍ مختلفة في أماكِن أخرى من الكَون.

عند التفكير بما هي الحياة، فإن رَسمَ خَطٍّ فاصِلٍ حَادٍّ بين الحياةِ والجَماد أمرٌ يُثيرُ الاهتمام، فمن الواضِح أنَّ الخلايا حَيَّةٌ وأنَّ جميعَ الكائنات التي تتألَّفُ من خلايا هي كائناتٌ حَيَّةٌ أيضًا. غير أن هناك أشكالٌ شبيهَةٌ بالحياة في حالَةٍ متوسّطَة.

المثالُ الواضح على تلك الحالَة هي الفيروسات. وهي كائناتٌ كيميائية تحتوي على مادة وراثية بعضُها تتألفُ من الحمض النووي DNA والأخرى من الحمض النووي RNA. وفيها مُوَرّثات ضرورية لصُنعِ غِلافٍ من البروتينات يُحيطُ بكلِّ فيروس. تتطَور الفيروسات بالانتقاء الطبيعي، وبذلك تَنجَحُ في اختِبار مولر، ولكن الأمور غير واضحة في جوانب أخرى خاصةً وأن الفيروسات لا تستطيع التكاثر بذاتِها والطريقةُ الوحيدة لتَكاثرها هي بالدخول إلى خلايا كائناتٍ حَيَّة والسَّيطَرة على استِقلابها وتَسخِيره لصالح تَّكاثُرِ الفيروس.

وهكذا عندما تُصابُ بالزّكام مثلًا، تَدخلُ فيروساتُ الزّكام إلى الخلايا التي تُبَطِّنُ أنفكَ وتُسَخِّرُ إنزيماتِ خلاياهُ ومَوادَّها لتكاثر الفيروس بَلايين المَرات. تُنتَجُ بلايين الفيروسات التي تُفَجِّر الخلايا المَصابة فتَتَحرَّر فيروسات الزّكام. تَدخلُ الفيروسات الجديدة إلى الخلايا المُجاورة وإلى الدّم لإصابة خلايا في مواضِع أخرى من جِسمكَ. إنها استراتيجيةٌ عالية الكفاءة لكي يتكاثَر الفيروس ولكنها تقتَضي بالضرورة أنَّ الفيروسات لا تستطيعُ العملَ بشكلٍ منعَزلٍ عن خلايا مُستَضيفِها، أو بكلمةٍ أخرى فالفيروساتُ طفيلياتٌ مُجبَرَةٌ على كائناتٍ حَيَّةً أخرى. يمكنكَ القولُ إنَّ الفيروسات تَمُرُّ في دَورةٍ بين

كَونِها "حَيَّةٌ" عندما تكونُ نشيطةً كيميائيًا وتتكاثر في الخلايا المُستَضيفَة، وبين كَونِها "غير حَيَّةٍ" عندما توجَدُ الفيروسات بحالَةٍ خامِلَة كيميائيًا خارجَ الخلايا.

يَستَنتِجُ بعضُ علماء البيولوجيا أنّ اعتمادَها الإجباري على كائناتٍ حَيَّةٍ أخرى يَعني أنَّ الفيروسات ليست "كائناتٌ حَيَّةٌ" حقيقية. ولكن مِنَ المُهمّ تَذكُّر أنّ معظمَ أشكال الحياة الأخرى، بما فيها الإنسان، تَعتَمد أيضًا على كائناتٍ حَيَّةٍ أخرى.

إن جسمكَ المألوف هو نظامٌ بيئيٌّ يتألفُ مِنْ خليطٍ مِنْ خلايا إنسانية وغير إنسانية. لدينا حوالي 30 تريليون خلية من خلايانا، ولكن في جِسمِنا عددٌ أكبر من خلايا بكتيرية متنوعة ومن البكتيريات القديمة والفطور ووحيدات خَلية حقيقية النواة تعيشُ داخلَ جِسمنا وعلى سَطحِه. يَحملُ بعضُ الناس في أجسامِهم حيواناتٍ كبيرة أيضًا مثل أنواع من الدِّيدان المعَوية وحشرات صغيرة ثُمانية الأرجُل تعيشُ على الجلد وتضَعُ بيوضَها في بُصَيلاتِ أشعارِنا. يَعتمدُ كثيرٌ من هؤلاء الرفاق غير الإنسانيين بشكلٍ وَثيقٍ على خلايانا وأجسامِنا، ولكننا نَعتَمدُ كذلك على بعضِها. فمَثلًا، تُنتِجُ البكتيريات في أمعائِنا حُموضًا أمينيةً معيَّنة أو فيتامينات لا تَستطيعُ خلايانا صُنعَها.

ويجب ألا نَنسَى أنَّ كل لُقمةٍ من الطعام نأكُلُها قد أنتَجَتْها كائناتٌ حَيَّةٌ أخرى، وكثيرٌ من الميكروبات، مثل الخَميرة التي دَرستُها تَعتَمدُ كليًا على جُزَيئات صَنَعَتْها عادةً كائناتٌ حَيَّةٌ أخرى. وهذا يشمَل السّكر والأمونيا الضَّروريان لصُنعِ جُزَئياتٍ كبيرة تضمُّ الكربون والنيتروجين.

تبدو النباتاتُ أكثر استقلالًا، إذ يُمكِنها سَحبُ غاز ثاني أكسيد الكربون من الهواء والماء من التراب واستِخدَام طَاقَة الشمس لصُنعِ كثيرٍ من الجُزَيئات الأكثر تعقيدًا التي تَحتاجُها مثل السّكريات وبوليمرات الكربون. ولكن حتى النباتات تَعتَمدُ على بكتيرياتٍ موجودة داخِلَ أو بالقُربِ مِنْ جذورها لتَثبيتِ النيتروجين من الجَو، وبدونِها لا تستطيعُ تركيبَ جُزَيئات الحياة الأكبر. وفي الحقيقة إنَّ هذا حَسبَ عِلمِنا هو عمليةٌ لا تستطيعُ حقيقياتُ النواة القيامَ به لوحدِها. يعني كلُّ هذا أنه لا يوجَدُ نَوعٌ واحدٌ مَعروفٌ من الحيوانات أو النباتات أو الفطور يستطيعُ لوحدِهِ القيامَ بكيمياءِ خلاياهُ كلّها.

ربما أكثر أشكال الحياة استقلالًا حقيقيًا والوحيدةُ التي تستطيعُ الادّعاء بأنها مستقلّة وحُرَّة تمامًا هي تلك التي تبدو بدائيةً جِدًا، وهي تَشملُ البكتيريات الزرقاء التي تُسمّى عادةَ الأُشنِيّات الزرق-الخضر Blue-Green Algae فهي تَستطيعُ القيامَ بالبِناء الضوئي وبتَثبيتِ النيتروجين

الذي تَحتاجُ إليه من الهواء، وكذلك البكتيريات القديمة التي تَحصلُ على طاقَتِها وموادِها الكيميائية الخَام مِنْ فوهاتٍ بركانيةٍ نَشِطَةٍ في أعماق البحار. من المدهِش أن هذه الكائنات البسيطة نسبيًا قد صَمَدَتْ أكثر مِنّا بكثير، وأنها أكثر اعتمادًا على نفسِها مِنّا نحن البَشَر.

ينعَكِسُ الاعتمادُ العميق المتبادَل بين أشكال الحياة المختلفة أيضًا في التَّكوينِ الأساسي لخلايانا. الميتوكوندريات التي تُنتِجُ الطاقَةَ التي تحتاجُها أجسامُنا كانت بكتيرياتٍ منفَصِلة تمامًا أتقَنَت القدرة على تركيبِ وحداتِ الطاقة ATP. وربما خلال صُدفَةٍ مَصيريَّةٍ حَدَثَتْ منذ حوالي 1.5 بليون سَنة مضَتْ سَكَنَتْ بعضُ هذه البكتيريات داخِلَ نَوعٍ آخَر من الخلايا. ومع مرور الزمن أصبَحَت الخلايا المُضيفَة مُعتَمِدةً تمامًا على وحدات ATP التي تُنتِجُها ضيوفها البكتيرية فأصبَحَت الميتوكوندريات جُزءًا دائمًا منها. ربما أشارَ تَرسيخُ علاقة الفائدة المتبادَلة هذه إلى بَدءِ جميعِ سُلالاتِ حَقيقياتِ النَّواة. استطاعَتْ خلايا حَقيقيات النّواة بفَضلِ توفّر تَموينٍ مَوثوقٍ من الطاقة أن تَنمو أكبر وتُصبِحَ أكثَرَ تعقيدًا. وأدّى ذلك بدَورِهِ إلى تطور ما نَعرِفُهُ هذه الأيام من التنوع الغَزير للحيوانات والنباتات والفطور.

يُبَيِّنُ كلُّ ذلك وجودَ طَيفٍ متَدَرِّجٍ من الكائنات الحَيَّة التي تمتدُ من الفيروسات المُجبَرَة على التَّطَفل، إلى البكتيريات الزرقاء-الخضراء والبكتيريات القديمة والنباتات الأكثر اعتمادًا على ذاتِها. أزعمُ أنَّ جميعَ هذه الأشكال المختلفة حَيَّةٌ لأنها كلُّها كائناتٌ ماديةٌ ذاتية التَّوَجُّه تَستطيعُ التطورَ بالانتقاء الطبيعي على الرغم من أنها تَعتَمدُ بدرجاتٍ مختلفة على كائناتٍ حَيَّةٍ أخرى.

تَبرُزُ من هذه الرؤية الأوسَع للحياة رؤيةٌ أغنَى نحو عالَمِ الأحياء. تَنتَمي الحياةُ على الأرض إلى نظامٍ بيئيٍّ واحِد واسِع التَّواصُل يَشمَلُ جميع الكائناتِ الحَيَّة. يَنبُعُ هذا التَّواصُل الأساسي من اعتمادِها المتبادَل العَميق، ومن واقِعِ أنَّ كلَّ الحياة لها علاقةٌ وراثية من خلال جُذورها التطورية المشترَكة. كان علماءُ البيئةِ أبطالَ هذه الرؤية للقَرابة العميقة والعلاقة المتبادَلة منذ زمن طويل. تَمتَدُّ جُذورها في تفكيرِ الكسندر فون همبولتAlexander von Humboldt المستَكشِف الرّائد وعالِم الطبيعة في القَرن التاسع عشر الذي طَرَحَ فكرةَ أن الحياةَ كلها مُترابِطَة مع بعضها بعضًا بشَبَكةٍ شامِلةٍ من التَّواصل. وربما كان من غير المتوقَّع أنَّ هذا التَّرابط جَوهري في الحياة ويجب أن يُعطينا سَببًا وَجيهًا للتَّوقُّف والتَّأمل بشكلٍ أعمَق عن تأثير نشاط الإنسان على بقية عالَم الأحياء.

تَتنوعُ أشكالُ الحياة بشكلٍ مدهِش على الفروع الكثيرة لشجرةِ عائلةِ الحياة، ولكنّ هذا التّنوع يُغَطِّي عليه التَّشابه الأكبر والأكثر أصولية. التفاصيلُ الأساسيةُ متَماثلةٌ في عَمَلِ هذه الآلات الكيميائية الفيزيائية المعلوماتية. فمَثلًا، تَستخدِمُ جميعُها الجُزَيءَ الصغير ATP ذاتِه كَعُملَةِ الطاقةِ فيها، وتَعتَمدُ على العلاقات الأساسية ذاتِها بين جُزَيئات DNA، RNA، والبروتينات. وتَستَخدِمُ الريبوزومات في صُنعِ بروتيناتها. بَيَّنَ فرانسيس كريك أن مَسار المعلومات من الحمض النووي DNA إلى RNA إلى البروتينات أساسيٌّ في الحياة حتى أَطلَقَ علها اسم "العقيدة المَركزية" في بيولوجيا الجُزَيئات. أشارَ بعضُهم إلى استثناءاتٍ قليلة لهذه القاعدة، ولكن نقطَةَ كريك الأساسية مازالت صَحيحة.

تُشيرُ هذه العموميات العميقة في الأسس الكيميائية للحياة إلى استِنتاجٍ مُثيرٍ: بَدَأت الحياةُ كما هي الآن على الأرض مَرَّةً واحدة، فلو أنَّ أشكالًا مختلفةً من الحياة قد ظَهَرَتْ مراتٍ عديدة بشكلٍ مستقلٍّ، واستَمرَّت في الوجود، فَمِنْ غَيرِ المَعقول أنْ تشترَكَ جميعُ سلالاتِها في عملياتِها الأساسية بهذه الطريقة المُتماثِلَة.

إذا كانت كلُّ الحياة جُزءًا من شجرةِ الحياة الهائلة نفسها، فما هي تلك البذرة التي نشَأت منها هذه الشجرة؟ بطريقةٍ ما، وفي مكانٍ ما منذ زمنٍ بعيدٍ جِدًا تَجَمَّعَتْ موادُ كيميائية جامِدة وغير منتَظَمة إلى أشكالَ أكثر انتِظامًا تستطيعُ تَكرارَ ونَسخ ذاتِها إلى أن اكتِسِبتْ في النهاية القدرة المهمّة على التطور بالانتقاء الطبيعي. ولكن كيف بَدَأتْ في الواقِع هذه القصة، التي هي قصَّتُنا أيضًا؟

تَشكَّلَت الأرضُ منذ أكثر من 4.5 بليون سنة في بداية تَكَوّنِ نظامِنا الشمسي. كان سطحُ الكوكب طوالَ نصفِ بليون سنة تقريبًا حارٌ جِدًا وغير مستقر ولا يَسمحُ بظُهورِ حياةٍ كما نَعرِفُها الآن. أقدَمُ مُستَحاثة مؤكَّدَة وجِدَتْ حتى الآن لكائنٍ حَيٍّ عاشَ منذ حوالي 3.5 بليون سنة. هذا يعني وجود فترة مئات الملايين من السنين لانطلاق الحياة، وهي فترةٌ أطول مما تَستطيعُ عقولُنا تصَورها بسهولة إلا أنها فترةٌ قصيرة جدًا من تاريخ الحياة على الأرض. يَعتَقدُ فرانسيس كريك أنه من غير المُحتَمل أن تكونَ الحياةُ قد بَدَأت في الأرضِ ضِمنَ الوقتِ المُتاح، ولذا فقد اقتَرَحَ أنها لا بد أن تكون قد نشَأت في مكانٍ آخَر من الكَون وانتَقلَتْ إلى الأرض إما بشكلٍ جُزئيٍّ أو بشكلٍ تامّ التّكوين. إلا أنّ هذه الفرضية تتَجنَّبُ السؤالَ الأساسي بَدَلَ الإجابةِ عليه، كيفَ نَشَأت الحياةُ من بداياتٍ مُتواضِعة؟ نَستطيعُ الآن أنْ نُقدِّمَ سَردًا معقولًا لهذه القصة ولو أنه لا يمكن إثبات صِحَتِه.

تبدو أقدَمُ مُستَحاثة مشابِهَة جِدًا لبَعضِ البكتيريات الموجودة الآن. وهذا يَدُلُّ على أن الحياة ربما كانت راسِخَةَ التَّكوين في ذلك الوقت بوجود خلايا مُحاطَة بأغشِية، ونظام وراثي يَعتَمدُ على الحمض النووي DNA، واستِقلاب يَعتمدُ على البروتينات.

ولكن أيُّها ظَهَرَ أولًا؟ المُوَرِّثاتُ التي تتألفُ من DNA؟ الاستقلابُ الذي يَعتَمدُ على البروتينات؟ أم الأغشِية المُحيطَة بها؟ تُشكِّلُ هذه الأنظِمة في الكائنات الحَيَّة الآن نظامًا متكاملًا لا يعمَل جيدًا إلا بكافَّةِ أجزائِهِ مَعًا. لا تَتضاعَفُ المُوَرِّثاتُ المَبنِيةُ من الحمض النووي DNA إلا بمساعَدة إنزيماتٍ بروتينية. ولكنَّ الإنزيمات البروتينية لا تتشَكَّل إلا حَسبَ معلوماتٍ موجودة في الحمض النووي DNA. كيفَ يمكنكَ أن تَحصَلَ على نظامٍ دون الآخَر؟ ثم هناك حقيقة أن المُوَرِّثات والاستِقلاب يَعتَمِدانِ كِلاهما على وجودِ غِلافِ الخليةِ الخارجي لتَركيزِ المَواد الكيميائية اللازمة وتَحصيلِ الطاقة وحِمايتِها من الظروف البيئية الخارجية. ولكننا نَعرِفُ أن الخلايا الحَيَّة الآن تَستخدِمُ مُوَرِّثاتٍ وإنزيماتٍ لكي تَبني أغشِيتِها المتطورة. يَصعُبُ تَصَوُّرُ كيف أنَّ كلًّا من عناصِرِ هذه الثلاثيةِ المهمّة مِنَ المُوَرِّثات والبروتينات والأغشِية يمكن أن ينشَأ لوحدِهِ. إذا حَذفتَ واحِدًا من هذه العناصر يَتفكَّكُ النظام كله.

ربما يكونُ تَكَوُّنُ الأغشِية هو أسهَل جُزء يمكِن حِسابه. نَعرفُ أن جُزَيئات الدّهون التي تشكّل الأغشِية يمكن أنْ تتشكّلَ بتفاعلات كيميائية تَحدُثُ تلقائيًا بوجود مواد وظروف بيئية يُعتَقَدُ أنها كانت متوفِّرة في الكرة الأرضية الفَتِيَّة. وعندما يضَعُ العلماءُ هذه الموادَ الدّهنية في الماء فإنها تَفعلُ أحيانًا ما هو غير متوقَّع: تُرتِّبُ نفسَها تلقائيًا في كُراتٍ فارِغَةٍ تُحيطُ بها أغشِيةٌ تُشبِهُ حَجمَ وشَكلَ بعض خلايا البكتيريات.

بوجودِ آليةٍ مقبولَةٍ لتكوين كِياناتٍ مُحاطَةٍ بأغشِية، يَتبَقّى السؤال فيما إذا تشكَّلَت المُوَرِّثات أم البروتينات أولًا؟ أفضَلُ إجابةٍ قدَّمَها العلماءُ حتى الآن لهذه المسألة هي أنَّ أيًا منهما لم يتكَوَّن أولًا! بل ربما كان الحمض النووي RNA هو الذي تشكَّلَ أولًا.

تستطيعُ جُزَيئات الحمض النووي RNA أن تُخَزِّنَ معلوماتٍ مثل جُزَيئاتِ DNA. كما أنها تَستطيعُ أنْ تُستَنسَخ مع حدوثِ أخطاء في عملية النَّسخ تَسمحُ بظُهور تَنوّع. يعني هذا أن RNA يمكن أن يَعملَ كجُزَيءٍ وراثيّ يستطيعُ التطور، وذلك ما تَفعَلُهُ فيروسات RNA هذه الأيام. الصِّفَةُ الأخرى المهمّة من صِفات جُزَيئات الحمض النووي RNA هي أنها يمكن أن تَنطَوي على نفسِها لتشكّل

هياكلَ ثلاثية الأبعاد قد تَعمَلُ مثل الإنزيمات. الإنزيماتُ المُكَوَّنَةُ من الحمض النووي RNA ليست معقّدة ومُتَنوعة مِثلَ الإنزيمات البروتينية، ولكنها تَستطيعُ تَحفِيزَ تفاعلاتٍ كيميائية معيَّنة. فمَثلًا، بعضُ الإنزيمات المهمّة الآن في عَمَلِ الريبوزومات مُكَوَّنَةٌ من الحمض النووي RNA. إذا جُمعَتْ هاتَان الصِّفَتان للحمض النووي RNA فربما تَمَكَّنتْ من انتاجِ جُزَيئات RNA تعملُ عَمَلَ مُوَرِّثَة وإنزيم: أي نظامٌ وراثيٌّ ونظامُ استقلابٍ بدائيٍّ في مُرَكَّبٍ واحد. يؤدّي ذلك إلى آلَةٍ حَيَّةٍ مَبنِيَّةٍ على الحمض النووي RNA ومُكتَفِيَةٍ بذاتِها.

يَعتَقد بعضُ الباحثين أن الآلات الحَيَّة المَبنِية من RNA ربما نشَأت أولًا في الصخور حول المَخارج البركانية في أعماق المحيطات. وربما شكَّلَت المَساماتُ الصغيرة في الصخور ظروفَ حِمايةٍ مَحَلية، بينما مَنَحَ النشاطُ البركاني الخارجُ من أعماق الأرض تَدفُّقًا مستمرًا من الطاقة والمواد الكيميائية. في مِثلِ هذه الظروف ربما تَشَكَّلَت النيوكليوتيدات التي تؤلِّفُ بوليمرات الحمض النووي RNA من جُزَيئات أبسَط. ربما قامَتْ ذرّاتٌ معدَنية موجودَة في الصخور بدَور إنزيماتٍ كيميائية وسَمَحَتْ للتفاعلات بالتقدّم دونَ مساعِدَةٍ من إنزيماتٍ بيولوجية. وبَعدَ آلاف المحاولات الفاشلة ربما أدّى ذلك إلى نُشوء أول آلة مَصنوعَة من الحمض النووي RNA التي كانت "حَيَّةً" تُحافِظُ على نفسِها وتتكاثر بذاتِها، وربما أصبَحَت بَعدَ ذلك كائناتٌ محاطَة بأغشِية. سيكون ذلك حَدَثًا تاريخيًا في نُشوء الحياة على الأرض: ظُهورُ أول خَلية حقيقية.

تبدو هذه القصة التي سَردتُها لكَ مُقنِعَةً، ولكن أرجو أن تتذكَّر أنها تأمُّلية جِدًا إذ أنَّ أشكالَ الحياة الأولى لم تَترِكْ أثَرًا، ومن الصعب مَعرفة ما كان يَحدُثُ فِعلًا في فَجرِ ظُهورِ الحياة، ولا حتى ما كانت عليه حالَةُ الكُرَةِ الأرضية بالضبط منذ أكثر من 3.5 بليون سنة.

وعلى كل حال، ما أن تَشكَّلت الخلايا الأولى بنجاحٍ، يَسهُلُ تَصَوُّرُ ما حَدَثَ بعد ذلك. انتَشَرت الميكروباتُ الوحيدة الخلية في العالَم تدريجيًا واستَعمَرت البحار والأرض والهواء. بَعدَ بليوني سنة تقريبًا ظَهرَت الخلايا الحقيقية النواة الأكبَر حَجمًا والأكثر تعقيدًا، ولكنها ظَلَّتْ وَحيدَةَ الخلية فترةً طويلة جِدًا. ظَهَرت الكائناتُ المُتعدِّدَةُ الخلايا ربما بَعدَ مرور بليون سنة أخرى. يعني ذلك أن الحياة المُتعدِّدَةَ الخلايا قد وجِدَتْ منذ حوالي 600 مليون سنة، أي أنها تَشغلُ حتى الآن سُدُس تاريخ الحياة على الأرض، ولكن خلال ذلك الزمن ظَهَرتْ جميعُ أشكال الحياة الأكبر حَجمًا والأكثر

مشاهَدة مِن حَولنا، مِثل الغابات الضخمة، ومستعمرات النَّمل المُزدَحِمة، وشَبكات الفطور المنتَشرة تحت الأرض، وقطعان الثدييات في سُهوب أفريقيا، والإنسان الحديث الذي ظَهَرَ منذ فترة وجيزة.

حَدَثَ كلُّ ذلك من خلال عمليةٍ عَمياء غير موجَّهَة، ولكنها خَلاّقة جِدًا هي التطور بالانتقاء الطبيعي. ولكن بالنظر إلى نجاح الحياة يجب أن نتذكَّر أن التّغير التّطوري لا يُمكِنُ أن يَحدُث بكفاءَة إلا إذا فَشِلَ بعضُ الأفراد في البَقاء والتكاثر. وهكذا، على الرغم من أن الحياة كَكلّ قد أثبَتَتْ جَدارَتَها في البقاء والعِناد والقابلية الكبيرة للتأقلم، إلا أنّ بعضَ أشكال الحياة قصيرةُ الأعمار وكانت قُدراتها مَحدودَة على التكيف عندما تغيّرت ظروفها البيئية. وهنا يأتي دَور الانتقاء الطبيعي بإنهاء النظام القديم وفَتح المَجال أمام التَّنوع الجديد المَوجود في المَجموع الحَيّ الأقدَر على التأقلم والاستمرار. يبدو أنَّ الحياة لا يُمكِنُ أن توجَدَ إلا بوجود المَوت.

نظامُ الغَربَلَةِ القاسي الذي لا يَرحَم في الانتقاء الطبيعي قد أنَشأ أمورًا غير متوقَّعة. أحَدُ أكثر هذه الأمور غرابةً هو العَقل البَشَري. حسبَ مَعرفَتِنا، لا يوجَدُ كائنٌ حَيٌّ آخَر يَشترِكُ معَنا بهذه الدَّرجة من الوعي لوجودِه الذّاتي. لا بد من أن عقولنا الواعية لذاتِها قد تطورَتْ جُزئيًا على الأقل لكي تَمنَحنا مُرونَة أكثر في تعديل سلوكِنا عندما تغيَّر عالَمُنا. وعلى العَكس من الفراشات وربما جميع الكائنات الحَيَّة الأخرى، فإننا نستطيعُ أن نَختارَ بإرادَتِنا ونفكّر في المَقاصِد التي تَدفَعُنا وتُحَفِّزُنا.

يَعتَمدُ الدماغُ على الكيمياء والفيزياء ذاتِها التي لَدى جميعِ الأنظِمة الحَيَّة الأخرى، ولكن بطريقةٍ ما تَنبَثِقُ من هذه الجُزَيئات البسيطة نسبيًا ذاتها والقوى المَعروفة جيدًا وتَظهَرُ قدراتُنا على التفكير والحوار والتّخيل والإبداع والمُعاناة. كيف ينشَأ كلُّ هذا من الكيمياء الرَّطبة لأدمِغَتِنا؟ يَطرَحُ علينا ذلك مجموعةَ أسئلةٍ تُثيرُ التَّحدي بشكلٍ استثنائي.

نَعرفُ أنَّ جِهازَنا العَصبي يَعتَمدُ على تفاعلاتٍ معقَّدة جدًا بين بلايين الخلايا العصبية التي تَشكِّل تريليونات الوَصلات بَينَ بعضها بعضًا. تَصنَعُ هذه الشبكاتُ الهائلة المتغيرة باستمرار من الخلايا العصبية المُتشابِكة مَساراتِ إشاراتٍ تَنقُلُ وتُعالِجُ تياراتٍ غنيّة من المعلومات الكهربائية.

مثلما هي الحالةُ عادةً في عِلم الأحياء فنحن نَعرفُ معظَم هذه المعلومات بدراسَةِ نَماذِجَ أبسِط من الكائنات، مِثلَ الديدان والحشرات والفئران. نَعرفُ كثيرًا عن كيفية جَمعِ المَعلومات في

هذه الأجهزة العصبية من ظروفِها البيئية من خلال حواسِّها. قامَ الباحثون بدراساتٍ مفصَّلة لمُتابَعة حركات البصر والصوت واللمس والرائحة والتذوق عَبرَ الجهاز العصبي، بالإضافة إلى مَساراتِ بعض الوَصلات العصبية التي تشكّل الذكريات وتَخلُق الدَّوافِع العاطفية ورُدودَ الأفعال مِثلَ انقباضِ العضلات.

هذا كله إنجازٌ مهمّ، ولكنه بداية فقط، إذ أننا لم نَلمِس سوى سَطحَ مَعرفَةِ وفَهمِ كيف تَجتَمعُ التفاعلات بين بلايين الخلايا العصبية المُفرَدة لِتُوَلِّدَ الأفكارَ المُجَرَّدَة والوعي الذاتي وإرادَتِنا الحُرَّة الظاهرة. محاوَلَةُ الحصول على إجاباتٍ مُقنِعَةٍ مَقبولة على هذه الأسئلة ربما ستَشغلُ القَرن الحادي والعشرين وربما أبَعدَ مِنهُ، ولا أظُنُّ أننا نَستطيعُ الاعتمادَ فقط على أدوات ووسائل العلوم الطبيعية التقليدية لكي نتوصَّلَ إلى ذلك. سيكونُ علينا تَبَنِّي وجهاتِ نظرٍ وأفكارٍ من عِلم النفس والفلسفة والإنسانيات بشكلٍ أوسَع وأعَم، وربما تُساعِدُنا علوم الكومبيوتر أيضًا. أقوى أجهزة الذكاء الاصطناعي هذه الأيام مُرَكَّبَةٌ بأساليبَ مبَسَّطَة جدًا لكي تُشبِهَ طريقَةَ الشبكاتِ العصبية الحَيَّة في مُعالَجة المعلومات.

تُنجِزُ أنظمةُ الكومبيوتر هذه مآثِرَ مثيرة للإعجاب في التعامل مع البيانات، إلا أنها لا تُحَقِّقُ شيئًا يَقتَرِبُ من التفكير المُجَرَّد أو التَّخيل أو الوعي الذاتي أو الإدراك. يَصعُبُ جدًا حتى تَعريفُ ما نَعنيه بهذه الصِّفات العقلية. وهنا ربما يُساعدُنا روائيٌّ أو شاعرٌ أو حتى فنّانٌ بتوضيح أسُسِ التفكير الإبداعي، أو بوَصفٍ أوضَح للحالَة العاطفية، أو بشِرحِ ما هو المَقصود فِعلًا بوجودِ الذات. لو توفَّرَتْ لنا لُغَةٌ مشترَكة، أو على الأقل تَواصُلٌ فكريّ أكبر بين الإنسانيات والعلوم لمناقشة هذه الظواهر، فلربما كنّا في وَضعٍ أفضَل لفَهم كيف ولماذا سَمَحَ التطور لنا كأنظِمَةٍ كيميائيةٍ مَعرِفِيةٍ لكي تصبحَ واعيةً بطريقةٍ ما لوجودِها ذاتِه. سيَحتاجُ الأمرُ إلى كلِّ خيالنا وإبداعِنا لكي نفهَمَ كيف ظَهَر الخيال والإبداع.

الكونُ واسعٌ لدرجَةٍ يصعُبُ تَخَيُّلها، ويبدو حسب قوانين الاحتمالات أنه من غير المحتمل أن الحياة قد ظَهَرَتْ مَرَّةً واحدةً فقط على مَرِّ كل هذا الزمن الطويل والمَكان الهائل الاتساع هنا في هذا الكَوكَب وحدَه. أما احتمالُ التِقائِنا بحياةٍ غريبة أخرى فهو قضيةٌ مختلفة. ولكن، لو حَدَثَ ذلك فإنني واثِقٌ من أنهم سيكونون مِثلَنا كائناتٌ أو آلاتٌ كيميائية فيزيائية مُكتَفِيَةٌ ذاتيًا، ومَبنيةٌ من بوليمرات تُخَزِّنُ شيفرةَ مَعلوماتٍ أُنتِجَتْ من خلال تَطَورٍ بالانتقاء الطبيعي.

كَوكَبُنا هو الزاويةُ الوحيدة في الكَون التي نَعرفُ بالتأكيد أنها تحتوي على الحياة. والحياةُ التي نحن جُزءٌ منها هنا على الأرض هي استثنائية. وهي تدهِشنا باستمرار، ولكن على الرغم من تنوعها الغَزير فإن العلماءَ يُحاولون فَهمَها، ويُقدّمُ هذا الفَهمُ مُساهَمَةً أساسية لثقافتِنا وحضارتِنا. هناك إمكانياتٌ كبيرة لتحسين مصير البَشرية يمكنُ أنْ يُقدِّمَها تزايدُ فَهمِنا لمَاهِيّة الحياة. ولكن هذه المَعرفة تُضيفُ ما هو أكثَر، لأنَّ عِلم الأحياء يُبَيِّنُ لنا أن جميعَ الكائنات الحَيَّة التي نَعرِفُها مُتَقارِبَةٌ ومُتواصِلَةٌ جِدًا، ونحن مُرابِطون بِتَواصُلٍ عميق مع جميع أشكالِ الحياة، مع الخنافس البطيئة والبكتيريات المُعدِيَة والخَمائر الفعّالة وغوريلات الجبال الفُضولية والفراشات الصفراء الخفَّاقَة التي رافَقَتْنا خلال رحلتِنا في هذا الكتاب، بالإضافة إلى كلِّ عُضوٍ من أعضاء العالَم الحَيّ. وهكذا فإن جميع هذه الأنواع هي الكائناتُ الحَيَّةُ الناجِيَةُ العظيمة وأحَدَثُ سُلالاتِ شجرةِ العائلة الواحَدة الهائلَةِ الضَّخامَة التي يَرجِعُ أصلُها عَبرَ سِلسِلَةٍ متَّصِلَةٍ من انقسامات الخلايا منذ زمنٍ سَحيق.

حسبَ عِلمِنا فإننا نحن البَشَر هُمُ الشَّكل الوحيد من أشكال الحياة الذين يُدرِكون هذه الصِّلَة العميقة ويُفكِّرون بمَعناها وأبعادِها. يُرتِّبُ علينا هذا مسؤوليةً في هذا الكَوكَب تجاه الحياة التي تتألَّفُ مِنْ أقارِبنا القَريبين والبَعيدين. يجب أن نَعتَني بها، ونَحتاجُ إلى العناية بها. ولكي نَفعَلَ ذلك يجب أنْ نفهَمَها.

عن المؤلف



بول نيرس Paul Nurse

هو عالِم وراثة وباحِث في عِلم الخلية دَرَسَ كيفية التَّحكم في تكاثر الخلايا. وهذه العمليةُ هي أساس نمو وتطور جميع الكائنات الحيّة. يَعملُ مديرًا لمَعهد فرانسيس كريكFrancis Crick Institute في لندن، وعمِلَ رئيسًا تنفيذيًا لأبحاث السرطان في بريطانيا، ورئيسًا لجامعة روكفلر، ورئيسًا للجمعية المَلَكية. حازَ بالمشارَكة على جائزة نوبل في الفيزيولوجيا أو الطب سنة 2001، وجائزة ألبرت لاسكر Albert Lasker Award وميداليات من الجمعية المَلَكية.

تم مَنحُهُ لَقَبَ فارس سنة 1999، وحَصَلَ على وسامِ جَوقَة الشَّرف الفرنسي سنة 2003، ووسام الشمس المُشرِقة من اليابان سنة 2018. خَدَمَ مدة خمس عشرة سنة في مجلس العلوم والتكنولوجيا، ومستشارًا لرئيس الوزراء ومجلس الوزراء، وهو الآن كبيرُ المُستشارين العِلميين للّجنة الأوروبية، وعضو في مجلس أمناء المتحف البريطاني.

يمارِسَ هوايةَ الطيران الشراعي والطائرات القديمة وحاصلٌ على رُخصَةِ طَيّار. يُحِبُّ المسرح والموسيقى الكلاسيكية والمَشي في الطبيعة وزيارة المتاحف ومعارض الفنون والجَري الهادئ.

"ما هي الحياة" هو أولُ كُتُبِه.